TESES E PROGRAMAS DE INVESTIGAÇÃO LNEC

TESE 05

INVENTARIANDO, MONITORIZANDO E GERINDO DE FORMA SUSTENTÁVEL RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS

33

A situação portuguesa, os desafios da União Europeia e a globalização

João Paulo de Cárcomo Lobo Ferreira

LMT21

TESES E PROGRAMAS DE INVESTIGAÇÃO LNEC

INVENTARIANDO, MONITORIZANDO E GERINDO DE FORMA SUSTENTÁVEL RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS

A situação portuguesa, os desafios da União Europeia e a globalização

João Paulo de Cárcomo Lobo Ferreira

Doktor-Ingenieur pela Universidade Técnica de Berlim e Licenciado em Engenharia Civil pelo Instituto Superior Técnico

Programa de Investigação apresentado a concurso para provimento na categoria de Investigador-Coordenador

LNEC • 2000

INVENTARIANDO, MONITORIZANDO E GERINDO DE FORMA SUSTENTÁVEL RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS

A Situação Portuguesa, os Desafios da União Europeia e a Globalização

Resumo

Este livro, publicado na série *Teses e Programas de Investigação* do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, foi originalmente apresentado em LOBO-FERREIRA (1999), documento esse que visou dar cumprimento ao estipulado no N.º 8.2, alínea b), do Aviso N.º 17 428/98 (2ª série) *Concurso de acesso a Investigador-Coordenador do Laboratório Nacional de Engenharia Civil,* publicado no Diário da República - II Série, N.º 256, de 5 de Novembro de 1998, constituindo:
"... uma síntese dos conhecimentos existentes sobre o tema a tratar, uma apresentação crítica dos problemas já tratados e dos problemas em aberto e um plano de estudos relativo a alguns desses problemas."
O plano de estudo cita *a metodologia proposta, o planeamento dos meios necessários, os objectivos a atingir e os benefícios operados da sua realização.*

No *Capítulo Segundo* apresenta-se uma selecção de metodologias necessárias ao desenvolvimento de inventários de recursos hídricos subterrâneos.

No *Capítulo Terceiro* apresentam-se estudos de investigação programada, aplicada ou por contrato, recentemente desenvolvidos ou em desenvolvimento a nível nacional, comunitário ou internacional, sobre monitorização de águas subterrâneas.

No *Capítulo Quarto* desenvolve-se o tema da protecção e reabilitação de aquíferos.

No *Capítulo Quinto* desenvolve-se o tema da gestão optimizada de aquíferos. Como resultado da pesquisa bibliográfica desenvolvida, apresenta-se o estado-da-arte da simulação/optimização para o planeamento e a gestão do abastecimento por águas subterrâneas, tendo-se focado em especial a modelação que integra a componente qualidade das águas subterrâneas.

No *Capítulo Sexto* apresenta-se um relato de âmbito "Temático" dos estudos desenvolvidos em Portugal sobre águas subterrâneas. Complementa-se este capítulo com a apresentação de estudos de carácter "Regional".

No *Capítulo Sétimo* apresentam-se discussões, conclusões e recomendações para acções comunitárias de investigação concretizáveis em projectos ou em acções concertadas de investigação a nível europeu. Destacam-se as acções que contaram com a colaboração do autor sobre prioridades da investigação comunitária no domínio da água, que permitem focar, a nível da Europa, as linhas mais carenciadas de investigação no domínio dos recursos hídricos subterrâneos.

No *Capítulo Oitavo* apresentam-se discussões, conclusões e recomendações para acções comunitárias de projectos de investigação ou de acções concertadas de investigação que contaram com a colaboração do autor sobre o tema internacionalização, que permitem focar a nível global, as linhas mais carenciadas de investigação no domínio dos recursos hídricos subterrâneos.

Finalmente, e dando razão de ser a este Programa de Investigação, o *Capítulo Nono* de LOBO-FERREIRA (1999) foi dedicado à apresentação de um *Plano de Estudos* integrando dez projectos de Investigação Programada e duas Acções Concertadas de Investigação. Neste livro apresenta-se a parte não-confidencial desses Projectos de Investigação e Acções Concertadas de Investigação, *i.e.* apresenta-se todo o conteúdo científico e exclui-se a componente *"administrativa"* como o nome dos potenciais clientes, os custos, a distribuição de pessoas-mês e os calendários, que se desenvolverão de 2000 a 2007.

Este Programa de Investigação visa, assim, (1) contribuir para uma melhor sustentação científica no domínio dos *Recursos Hídricos Subterrâneos*, incorporando criticamente o vasto conhecimento já adquirido no País; (2) contribuir para um melhor conhecimento sobre os temas de investigação na União Europeia, visando o reforço das actividades nacionais de investigação, em recursos hídricos subterrâneos, no contexto actual de vontade política de incrementar a acção portuguesa de investigação na Europa; e (3) contribuir para um melhor conhecimento nacional sobre o tema da internacionalização além União Europeia, visando o reforço das actividades nacionais de investigação em recursos hídricos subterrâneos aplicados ao contexto actual, e pretendido, de globalização e afirmação do papel internacional da investigação comunitária.

MEASURING, MONITORING AND MANAGING SUSTAINABILITY: THE GROUNDWATER DIMENSION

The Portuguese Situation, the Challenges of the European Union and the Globalisation

ABSTRACT

This book, originally presented in LOBO-FERREIRA (1999), the document written by the author aiming at the fulfilment of the legislation *N.º 8.2, paragraph b), of the Notice N.º 17 428/98 (2nd. series) Public Competition for access to the post of Principal Research Officer of the Laboratório Nacional de Engenharia Civil*, published in the Portuguese Journal *"Diário da República - II Série, N.º 256", dated November 5, 1998*. LOBO-FERREIRA (1999) therefore constituted: "... a synthesis of the know-how available on the selected theme, a critical overview of the problems already addressed and of the problems still requiring research and a Plan of Studies regarding some of those problems". *The Plan of Studies* shall mention *the proposed methodology, the planning of the means required towards the achievement of the aimed objectives and the benefits generated by its concretisation.*

The Second Chapter presents a selection of the methodologies required for the development of groundwater resources inventories.

The Third Chapter presents programmed research studies, applied research studies or research studies under contract, on groundwater resources monitoring, recently developed or still under development not only at the Portuguese, but also at the Community and at other international levels.

The Fourth Chapter develops the topic of aquifer protection and rehabilitation.

In *The Fifth Chapter* the topic of the optimised management of aquifers is addressed. One of the results of the literature review was the achievement of a state-of-the-art on *simulation/optimisation* for the planning and the management of water supply by groundwater. Special emphasis was given to the problem of mathematical modelling that includes groundwater quality aspects.

The Sixth Chapter aims at giving an overview of studies recently developed in Portugal not only those based on "Thematic" topics but also those more specifically addressing "Regional" studies.

In *The Seventh Chapter* a review of discussions, conclusions and recommendations of Community research meetings and workshops carried out for the detection of research needs is presented. The aim was the shortening of the detected gaps through the proposal and the development of the best research project and concerted research actions at the European level. From those meetings, the actions that counted with the participation of the author were highlighted. They aimed at the detection of research priorities on the water resources sector in general, and more specifically in the groundwater sector, the topic of this book.

Similarly, in *The Eight Chapter* a review of discussions, conclusions and recommendations of research meetings and workshops, carried out on a worldwide basis, for the detection of international research needs is presented. From those meetings, the actions that counted with the participation of the author were highlighted, regarding the water resources sector in general, and more specifically the groundwater sector.

Finally, and fulfilling the aim of the Research Programme *The Ninth Chapter* of LOBO-FERREIRA (1999), was dedicated to the proposal of 10 Research Project and two Concerted Actions. In this book the non-classified portion of the Research Projects and the Concerted Actions (*i.e.* all but potential client names, costs, distribution of person-months and schedules ranging from 2000 to 2007) are presented.

This Research Programme aims, therefore, (1) at contributing to a better scientific support in the domain of *Groundwater Resources*, critically taking advantage of the vast know-how already available in Portugal; (2) contributing to a better knowledge on the research topics of the European Union, aiming at the reinforcement of Portuguese research activities in the field of groundwater resources, in the present Portuguese political will of increasing Portuguese action of research in Europe; and (3) contributing to a better Portuguese national knowledge on the topic of internationalisation behind the European Union's borders, aiming at the reinforcement of the Portuguese national activities of research in the field of groundwater resources, applied to the present context and political will of globalisation, as part of the reinforcement of the international role of research of the European Union worldwide.

INVENTARIANDO, MONITORIZANDO E GERINDO DE FORMA SUSTENTÁVEL RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS

A Situação Portuguesa, os Desafios da União Europeia e a Globalização

ÍNDICE DO TEXTO

CAPÍTULO PRIMEIRO - APRESENTAÇÃO GERAL 1

1. INTRODUÇÃO 1
2. TEMA DO PROGRAMA DE INVESTIGAÇÃO 2
3. CONTEXTO ACTUAL 2
4. ORGANIZAÇÃO DO PROGRAMA DE INVESTIGAÇÃO 5

CAPÍTULO SEGUNDO - RECARGA DE AQUÍFEROS E AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE À POLUIÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS 9

1. INTRODUÇÃO 11
2. METODOLOGIAS DE ANÁLISE DA RECARGA DE AQUÍFEROS 12
2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS 12
2.2 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA RECARGA DE AQUÍFEROS 13
2.2.1 Considerações Gerais 13
2.2.2 Balanço Hídrico 14
2.2.3 Determinação da Recarga de Águas Subterrâneas a partir da Análise de Hidrogramas de Escoamento 19
2.2.4 Balanço de Cloretos 27
2.2.5 Estimativa da Recarga por Análise da Concentração de Trítio 29
2.2.6 Método de Kessler 33
2.2.7 Análise da Variação do Nível Freático e/ou do Nível Piezométrico 35
2.2.8 Aplicação da Lei de Darcy 35
2.2.9 Controlo dos Caudais de Nascentes 36
2.2.10 Avaliação da Recarga de Aquíferos usando a Modelação Estocástica Inversa 36
3. SÍNTESE CONCLUSIVA SOBRE A APLICAÇÃO DE MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE RECARGA DE AQUÍFEROS 38
4. FUNDAMENTOS, CONCEITOS E MÉTODOS DE CÁLCULO DA VULNERABILIDADE À POLUIÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS 39
4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS 39
4.2 ALGUNS MÉTODOS "CLÁSSICOS" UTILIZADOS PARA MAPEAMENTOS NACIONAIS OU REGIONAIS DA VULNERABILIDADE À POLUIÇÃO NAS DÉCADAS DE 70 E 80 40
4.2.1 Mapa da Vulnerabilidade de Valence, França, pelo BRGM (1979) 40
4.2.2 Os Mapas de Vulnerabilidade do Reino Unido 41
4.2.3 O Mapeamento "Clássico" da Vulnerabilidade à Poluição de Portugal Continental 42
4.3 CONCLUSÕES EM RELAÇÃO AOS MÉTODOS CLÁSSICOS REVISTOS ANTERIORMENTE PARA MAPEAMENTO DA VULNERABILIDADE À POLUIÇÃO 43
4.3.1 Mapa de Vulnerabilidade de Valence, França 43
4.3.2 Os Mapas de Vulnerabilidade do Reino Unido 43
4.3.3 Mapeamento "Clássico" da Vulnerabilidade à Poluição das Regiões do Algarve e do Alentejo 44
4.4 NOVOS CONCEITOS PARA A DEFINIÇÃO DA VULNERABILIDADE DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS À POLUIÇÃO 44

4.5 SISTEMA DE VULNERABILIDADE PROPOSTO PARA O NOVO MAPEAMENTO (COMPARÁVEL) DA VULNERABILIDADE À POLUIÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DOS ESTADOS-MEMBROS DA CEE (1991) 46
4.6 O ÍNDICE DE VULNERABILIDADE À POLUIÇÃO GOD 47
4.7 O ÍNDICE DE VULNERABILIDADE À POLUIÇÃO AVI 48
4.8 O ÍNDICE DE VULNERABILIDADE À POLUIÇÃO DRASTIC 48
4.8.1 Apresentação Geral 48
4.8.2 Fundamentos 49
4.8.3 A Variante Italiana SINTACS 50
4.9 O ÍNDICE DE VULNERABILIDADE À POLUIÇÃO SEEPAGE 50
5. A EXPERIÊNCIA DO LNEC EM ESTUDOS DE AVALIAÇÃO E MAPEAMENTO DA RECARGA DE AQUÍFEROS E DA VULNERABILIDADE DRASTIC À POLUIÇÃO 52
5.1 INTRODUÇÃO AO INVENTÁRIO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DE PORTUGAL DESENVOLVIDO NO LNEC 52
5.2 AS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA FAIXA COSTEIRA LITORAL E A VULNERABILIDADE DOS SEUS AQUÍFEROS À POLUIÇÃO 54
5.2.1 Objectivos do Estudo 54
5.2.2 Caracterização da Recarga de Aquíferos 55
5.2.3 Mapeamento DRASTIC da Vulnerabilidade das Águas Subterrâneas à Poluição 55
5.3 PROTOCOLO INAG-LNEC SOBRE "CARTOGRAFIA AUTOMÁTICA DA VULNERABILIDADE DE AQUÍFEROS COM BASE NA APLICAÇÃO DO MÉTODO DRASTIC" 58
5.4 MAPEAMENTO DA VULNERABILIDADE À POLUIÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA REGIÃO DE ALQUEVA, UTILIZANDO O MÉTODO DRASTIC 60
5.4.1 Comentários Gerais 60
5.4.2 Mapeamento DRASTIC 61
5.4.3 Mapeamento DRASTIC Pesticidas 61
5.5 DESENVOLVIMENTO DA COMPONENTE RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS DOS PLANO DE BACIA HIDROGRÁFICA PARA O INSTITUTO DA ÁGUA (INAG) E PARA AS DIRECÇÕES REGIONAIS DO AMBIENTE (DRAs) 61
5.5.1 Considerações Gerais 61
5.5.2 Metodologias de Avaliação da Recarga de Aquíferos e da Vulnerabilidade à Poluição solicitadas pelo INAG para os Planos de Bacia 62
5.5.3 Caracterização e Pré-Diagnóstico da Situação de Referência do Plano de Bacia Hidrográfica do Rio Tejo 64
6. OUTROS ESTUDOS DE AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE DRASTIC À POLUIÇÃO 66
6.1 PESQUISA FEITA ÀS BASES DE DADOS WATER RESOURCES ABSTRACTS E ENVIRONMENT LIBRARY (EDITORA SILVERPLATTER INTERNATIONAL) SOBRE APLICAÇÕES DO MÉTODO DRASTIC 66
6.2 SELECÇÃO DE RESULTADOS DA PESQUISA FEITA À INTERNET SOBRE APLICAÇÕES DO MÉTODO DRASTIC EM 17 DE MARÇO DE 1999 66
6.3 OPINIÕES DO AUTOR E DE OUTROS AUTORES SOBRE A APLICAÇÃO DE MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE DE AQUÍFEROS 67
6.3.1 Opinião do autor 67
6.3.2 Opiniões de outros autores 70
7. SÍNTESE CONCLUSIVA SOBRE A APLICAÇÃO DE MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE À POLUIÇÃO DE AQUÍFEROS 79

CAPÍTULO TERCEIRO - MONITORIZAÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS 81

1. INTRODUÇÃO 83
2. ENQUADRAMENTO COMUNITÁRIO 84
3. MONITORIZAÇÃO QUANTITATIVA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS 85
3.1 OBJECTIVOS 85
3.2 FACTORES QUANTITATIVOS 86
3.3 PONTOS DE OBSERVAÇÃO 86
3.4 GRUPOS DE REDES 86
3.5 REQUISITOS PARA A DEFINIÇÃO DA DENSIDADE E DA FREQUÊNCIA DE AMOSTRAGEM, ATRAVÉS DA ANÁLISE DA VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL 87
3.5.1 Considerações Gerais 87

3.5.2 Variabilidade Espacial em Redes Nacionais/Regionais Principais ou de Referência *87*
3.5.3 Variabilidade Espacial em Redes Específicas, Complementares ou Especiais *89*
3.5.4 Variabilidade Temporal em Redes Específicas, Complementares e Especiais *90*
3.6 ANÁLISE CUSTO-EFICÁCIA APLICADA A PROGRAMAS DE MONITORIZAÇÃO 91
3.7 RECOMENDAÇÕES 91
4. MONITORIZAÇÃO QUALITATIVA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS 93
4.1 OBJECTIVOS 93
4.1.1 Caracterização da Qualidade das Águas Subterrâneas *93*
4.1.2 Práticas de Monitorização Qualitativa de Aquíferos *94*
4.2 FACTORES QUALITATIVOS 95
4.3 MECANISMOS DE CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS 96
4.4 MONITORIZAÇÃO EM CONDIÇÕES ESTÁTICAS 97
4.5 MONITORIZAÇÃO EM CONDIÇÕES DINÂMICAS 98
4.6 OUTROS COMENTÁRIOS SOBRE DENSIDADE E FREQUÊNCIA DE AMOSTRAGEM 98
5. A BASE DE DADOS INVENTAR E A MONITORIZAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS 100
6. MONITORIZAÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM PORTUGAL 101
6.1 CARACTERIZAÇÃO DA SITUAÇÃO NACIONAL 101
6.1.1 Caracterização Geral *101*
6.1.2 Antecedentes da Monitorização Quantitativa das Águas Subterrâneas Portuguesas *103*
6.1.3 Antecedentes da Monitorização Qualitativa das Águas Subterrâneas Portuguesas *103*
6.1.4 A Campanha de Amostragem de Águas Subterrâneas dos Sistemas Aquíferos do Baixo Tejo e Sado Desenvolvida pelo LNEC em Outubro e Novembro de 1998 ..... *105*
6.2 DADOS QUANTITATIVOS E QUALITATIVOS DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS PORTUGUESAS DISPONÍVEIS NA PÁGINA DO INAG NA INTERNET 108
7. CUSTOS DE MONITORIZAÇÃO 108
7.1 ESTUDO DESENVOLVIDO PELO LNEC, WRC, AWW E GEUS PARA A EC-DGXI 108
7.2 CUSTOS DE MONITORIZAÇÃO EM PORTUGAL 109

CAPÍTULO QUARTO - PROTECÇÃO E REABILITAÇÃO DE AQUÍFEROS 111

1. INTRODUÇÃO 113
2. PROTECÇÃO DE AQUÍFEROS 114
2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS 114
2.2 CONCEITO DE ZONA DE PROTECÇÃO DE CAPTAÇÕES DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS 115
2.3 LEGISLAÇÃO NACIONAL SOBRE ZONAS DE PROTECÇÃO DAS CAPTAÇÕES DE ÁGUA SUBTERRÂNEA 116
2.4 CRITÉRIOS E MÉTODOS PARA A DEFINIÇÃO DE ZONAS DE PROTECÇÃO DE CAPTAÇÕES DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS 116
2.5 CONTRIBUTO EXPERIMENTAIS PARA UMA NOVA LEGISLAÇÃO NACIONAL SOBRE PROTECÇÃO DE CAPTAÇÕES DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS 121
3. REABILITAÇÃO DE AQUÍFEROS 125
3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS 125
3.2 CAMPO DE APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE REABILITAÇÃO 125
3.3 ETAPAS DO DESENVOLVIMENTO DE UM PLANO DE REABILITAÇÃO 126
3.4 MEDIDAS DE CONTENÇÃO 126
3.4.1 Síntese das Principais Tecnologias *127*
3.5 TECNOLOGIAS FÍSICAS DE REABILITAÇÃO 128
3.5.1 Considerações Gerais *128*
3.5.2 Caracterização dos Sistemas de Bombagem e de Tratamento *129*
3.6 TECNOLOGIAS QUÍMICAS DE REABILITAÇÃO IN SITU 130
3.6.1 Síntese das Principais Tecnologias *130*
3.6.2 Campo de Aplicação de Tecnologias de Reabilitação Química *133*
3.7 TECNOLOGIAS BIOLÓGICAS DE REABILITAÇÃO 134
3.7.1 Considerações Gerais *134*
3.7.2 Campo de Aplicação *135*
3.7.3 Requisitos para a Aplicação *135*
3.7.4 Síntese das Principais Tecnologias *137*
4. CONCLUSÕES 142

CAPÍTULO QUINTO - GESTÃO OPTIMIZADA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. UMA ANÁLISE DA LITERATURA INTERNACIONAL 143

1. INTRODUÇÃO 145
2. PROBLEMAS DE ENGENHARIA ENVOLVENDO O TEMA GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS 147
3. A SIMULAÇÃO HIDROGEOLÓGICA E A OPTIMIZAÇÃO 150
4. A COMPONENTE DE SIMULAÇÃO HIDROGEOLÓGICA 154
5. A COMPONENTE DE OPTIMIZAÇÃO 159
6. O ESTADO-DA-ARTE EM 1983 163
6.1 INTRODUÇÃO 163
6.2 CLASSIFICAÇÃO DE MODELOS DE GESTÃO DO ABASTECIMENTO POR ÁGUAS SUBTERRÂNEAS 163
6.3 MODELOS DE GESTÃO DO ABASTECIMENTO POR ÁGUAS SUBTERRÂNEAS 164
6.4 CLASSIFICAÇÃO DE MODELOS DE GESTÃO DA QUALIDADE DE ÁGUAS
6.5 SUBTERRÂNEAS 166
6.5 MODELOS DE GESTÃO DA QUALIDADE DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS 166
6.6 CONCLUSÕES DA REVISÃO FEITA POR GORELICK (1983) 167
7. A INVESTIGAÇÃO DESDE 1983 169
7.1 INTRODUÇÃO 169
7.2 MODELOS DE GESTÃO DO ABASTECIMENTO POR ÁGUAS SUBTERRÂNEAS 170
7.3 CONCEITOS DE "EXPLORAÇÃO SEGURA" E DE "NÍVEL-OBJECTIVO" NA GESTÃO DO ABASTECIMENTO POR ÁGUAS SUBTERRÂNEAS 172
7.4 MODELOS DE GESTÃO DO ABASTECIMENTO POR ÁGUAS SUBTERRÂNEAS INCLUINDO OBJECTIVOS DE QUALIDADE DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS 175
7.5 MODELOS PARA GESTÃO DE FONTES DE POLUENTES DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS 177
7.6 SÍNTESE SOBRE ESTUDOS DE OPTIMIZAÇÃO EM PORTUGAL 180
8. CONCLUSÕES 183
8.1 SUMÁRIO 183
8.2 SUGESTÕES PARA LINHAS DE INVESTIGAÇÃO FUTURAS 188

CAPÍTULO SEXTO - A INVESTIGAÇÃO RECENTE SOBRE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM PORTUGAL 195

1. INTRODUÇÃO 197
2. ORGANIZAÇÃO DO CAPÍTULO 198
3. ESTUDOS DE ÂMBITO ESSENCIALMENTE "TEMÁTICO" 199
3.1 INTRODUÇÃO 199
3.2 GEOESTATÍSTICA 199
3.3 GEOFÍSICA 203
3.4 GEOTERMIA 205
3.5 CAPTAÇÕES/LEGISLAÇÃO 207
3.6 IMPACTO AMBIENTAL DE ACTIVIDADES ANTRÓPICAS 208
3.7 ZONA NÃO-SATURADA 209
3.8 AQUÍFEROS CÁRSICOS 210
3.9 RECARGA ARTIFICIAL 211
3.10 VULNERABILIDADE À POLUIÇÃO 211
3.11 MONITORIZAÇÃO 212
4. ESTUDOS DE ÂMBITO ESSENCIALMENTE "REGIONAL" 214
4.1 INTRODUÇÃO 214
4.2 ESTUDO DOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS DO ALENTEJO (ERHSA) 214
4.3 AÇORES 225
4.4 AVEIRO 228
4.5 MADEIRA E PORTO SANTO 230
4.6 ALGARVE 230
4.7 RIBATEJO, OESTE E VALE DO TEJO 231
4.8 BEIRAS 232

4.9 MINHO 233
4.10 TRÁS-OS-MONTES 234
5. CONCLUSÕES 234

CAPÍTULO SÉTIMO - OS DESAFIOS DA UNIÃO EUROPEIA QUANTO À INVESTIGAÇÃO E AO AMBIENTE NO DOMÍNIO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS 237

1. TEMAS E ORGANIZAÇÃO DO QUINTO PROGRAMA-QUADRO DE INVESTIGAÇÃO 239
1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS 239
1.2 CONTEÚDO E ORGANIZAÇÃO DA PRIMEIRA ACÇÃO 240
1.2.1 Considerações Gerais *240*
1.2.2 "Acções-chave" *241*
1.3 CONTEÚDO E ORGANIZAÇÃO DAS SEGUNDA, TERCEIRA E QUARTA ACÇÕES 241
2. ENERGIA, AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL 242
2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS 242
2.2 AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL 242
2.2.1 "Acções-chave" *242*
3. PREPARAÇÃO DE UMA REDE DE MONITORIZAÇÃO. PROGRAMA DE ACÇÃO INTEGRADA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS 244
4. EUROPEAN WORKSHOP ON RESEARCH AND TECHNOLOGICAL DEVELOPMENT FOR FRESHWATER RESOURCES MANAGEMENT IN THE COMMUNITY 246
5. CONTRIBUIÇÃO PORTUGUESA PARA A TASK FORCE ÁGUA-AMBIENTE 248
5.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS 248
5.2 *EXECUTIVE SUMMARY* DA PORTUGUESE *CONTRIBUTION TO THE TASK FORCE ENVIRONMENT • WATER* 248
6. EUROPEAN SCIENCE FOUNDATION - GROUNDWATER POLLUTION (GPOLL) 250
6.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS 250
6.2 A CONFERÊNCIA GPOLL DE GÖTEBORG 1998 251
6.2.1 Considerações Gerais *251*
6.2.2 Relatórios dos Grupos de Trabalho *252*
6.2.3 Grupo de Trabalho 1 ..... *252*
6.2.4 Grupo de Trabalho 2 ..... *253*
6.2.5 Grupo de Trabalho 3 ..... *257*

CAPÍTULO OITAVO - AFIRMAÇÃO DO PAPEL INTERNACIONAL DA INVESTIGAÇÃO COMUNITÁRIA NO DOMÍNIO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS 259

1. INTRODUÇÃO 261
1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS 261
1.2 OBJECTIVOS DO QUINTO PROGRAMA-QUADRO QUANTO A COOPERAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA A NÍVEL INTERNACIONAL 262
2. ACTIVIDADES ESPECÍFICAS DO QUINTO PROGRAMA-QUADRO 263
2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS 263
2.2 COOPERAÇÃO COM PAÍSES TERCEIROS EM VIAS DE DESENVOLVIMENTO OU COM ECONOMIAS EMERGENTES 264
2.2.1 Países Parceiros Mediterrânicos *264*
2.2.2 Investigação para o Desenvolvimento *265*
2.2.3 Países de Economia Emergente e Países Industrializados *266*
2.3 FORMAÇÃO DOS INVESTIGADORES 266
2.4 COORDENAÇÃO 267
2.4.1 Coordenação das Actividades do Programa-Quadro entre si e com as Actividades dos Outros Programas Comunitários *267*
2.4.2 Coordenação com os Estados-Membros *269*
3. INCO-DEVELOPMENT: COOPERAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA COM A ÁSIA NA ÁREA DA GESTÃO SUSTENTÁVEL DOS RECURSOS NATURAIS 269

3.1 INTRODUÇÃO 269
3.2 CONCLUSÕES 271
3.2.1 Conclusões Gerais 271
3.2.2 Síntese do Relatório do Thematic Cluster T2: Sustainable management of surface and groundwater resources and technologies to improve its quality 272
3.2.3 Resumo das Conclusões Apresentadas pelo Prof. Tilak Viegas (DGXII-INCO-DC Programme Co-ordination) 273
4. ASEM: CONTRIBUIÇÃO PORTUGUESA PARA O WORKING PAPER ON WATER ISSUES - A FOLLOW-UP OF THE FIRST PREPARATORY MEETING FOR ASEM SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL MINISTERS, HELD IN BEIJING, P. R. CHINA 274
4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS 274
4.2 OS DESAFIOS 274
4.3 TIPOS DE INVESTIGAÇÃO, LIGAÇÕES INTER-SECTORIAIS E MECANISMOS 276
4.3.1 Os Desafios Propostos pelo Portuguese Contribution Paper 276
4.3.2 Temas Propostos pelo Portuguese Contribution Paper para Projectos ASEM 276
4.3.3 Prioridades Recomendadas pelo Portuguese Contribution Paper para Cooperação ASEM 276
5. LINHAS DE COOPERAÇÃO COMUNITÁRIA INTERNACIONAL COM O SUL DE ÁFRICA 277
5.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS 277
5.2 TEMAS PARA REFLEXÃO 277
6. COOPERAÇÃO CIENTÍFICA DE ONGS COM OS PAÍSES DE LÍNGUA OFICIAL PORTUGUESA (BRASIL E ÁFRICA) 279
6.1 SIMPÓSIOS DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LÍNGUA OFICIAL PORTUGUESA (SILUSBA) 279
6.1.1 O 1º SILUSBA, Lisboa 1994 279
6.1.2 O 2º SILUSBA, Recife, Brasil, 1995 281
6.1.3 O 3º SILUSBA, Maputo, Moçambique, 1997 283
6.2 SIMPÓSIOS LUSO-BRASILEIROS DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL (SILUBESA) 284
6.2.1 Considerações Gerais 284
6.2.2 Recomendações para Acção Aprovadas no VI SILUBESA 285

CAPÍTULO NONO - PLANO DE ESTUDOS SOBRE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS ... 287

1. INTRODUÇÃO 289
2. SÍNTESE DAS CARÊNCIAS DE INVESTIGAÇÃO DETECTADAS NA ANÁLISE EFECTUADA NOS CAPÍTULOS SEGUNDO AO OITAVO 289
3. CONCEPÇÃO DO PLANO DE ESTUDOS SOBRE RECURSOS HÍDICOS SUBTERRÂNEOS 300
4. PARTE I - INVESTIGAÇÃO EM PORTUGAL 302
4.1 INVESTIGAÇÃO SOBRE RECARGA DE AQUÍFEROS 302
4.1.1 Programa de Investigação P1 - Estudos de calibração de métodos de avaliação da recarga regional de aquíferos e de outras regiões de interesse hidrogeológico 302
4.1.2 Programa de Investigação P2 - Ensaios de laboratório e modelação matemática da infiltração e do escoamento, na zona vadosa e na zona saturada 307
4.2 INVESTIGAÇÃO SOBRE VULNERABILIDADE À POLUIÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS 311
4.2.1 Programa de Investigação P3 - SADCC: Validação e verificação do desempenho de modelos de avaliação da vulnerabilidade à poluição de águas subterrâneas: Aplicação a países da UE e da SADCC 311
4.3 INVESTIGAÇÃO SOBRE MONITORIZAÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS 312
4.3.1 Programa de Investigação P4 - Monitorização de águas subterrâneas em antigas lixeiras e em novos aterros sanitários 312
4.4 INVESTIGAÇÃO SOBRE PROTECÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS 316
4.4.1 Programa de Investigação P5 - Zonamento e mapeamento automático de perímetros de protecção de captações de águas subterrâneas 316
4.5 INVESTIGAÇÃO SOBRE QUALIDADE E REABILITAÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS 319
4.5.1 Programa de Investigação P6 - Desnitrificação in situ de aquíferos poluídos por nitratos 319
4.5.2 Programa de Investigação P7 - Interacção qualitativa águas superficiais - águas subterrâneas: Aplicação ao caso de estudo dos campos da Golegã, no Paúl do Boquilobo 326
4.6 INVESTIGAÇÃO SOBRE OPTIMIZAÇÃO E GESTÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS 331

4.6.1 Programa de Investigação P8 - Simulação, optimização e gestão de sistemas aquíferos sujeitos a intrusão salina 331
5. PARTE 2 - INVESTIGAÇÃO NA EUROPA 338
5.1 PAÍSES DA UNIÃO EUROPEIA 338
5.1.1 Programa de Investigação P9 - AC1 - COST: The Future of Water in Europe 338
5.2 RÚSSIA 341
5.2.1 Programa de Investigação P10 - INTAS: Methods of groundwater vulnerability assessment and mapping in case of massive and local chemical and radioactive contamination 341
6. PARTE 3 - INVESTIGAÇÃO NO RESTO DO MUNDO 349
6.1 PAÍSES DE ÁFRICA: MEDITERRÂNICOS, PALOP E ÁFRICA DO SUL 349
6.1.1 Programa de Investigação P11 - Desenvolvimento de metodologias para avaliação de recursos e riscos hidrogeológicos de ilhas vulcânicas: Portugal (Porto Santo e Graciosa), Cabo Verde (Sto. Antão), S. Tomé e Príncipe (Príncipe), Guiné-Bissau (Bijagós) 349
6.1.2 Programa de Investigação P8 - MEDEA: MEDiterranean Environment Aquifers Sustainable management of coastal freshwater resources under socio-economic (urbanisation, tourism) development and climate scenarios 353
6.1.3 Programa de Investigação P3 - SADCC: Validação e verificação do desempenho de modelos de avaliação da vulnerabilidade à poluição de águas subterrâneas: Aplicação a Países da UE e da SADCC 359
6.2 PAÍSES DA AMÉRICA LATINA: BRASIL 365
6.2.1 Programa de Investigação P1+P10-BRASIL - Estudos de calibração de métodos de avaliação da recarga regional de aquíferos e optimização da exploração de águas subterrâneas: Aplicação ao Nordeste Brasileiro 365
6.2.2 Programa de Investigação P7 - MERCOSUR - Interacção águas superficiais-águas subterrâneas. Estudo de alternativas de tratamento de solos e de águas subterrâneas contaminados por metais pesados. Ensaios de laboratório e implementação numa área contaminada 368
6.3 PAÍSES DA ÁSIA: ASEM 371
6.3.1 Programa de Investigação P6 - China: In situ rehabilitation of polluted aquifers. Optimisation of methodologies 371
6.3.2 Programa de Investigação P12-AC2 - ASEM: BINGO 2000 - An EU-ASEM Concerted Action on measuring, monitoring and managing sustainability: the groundwater & coastal zones dimensions 379

CAPÍTULO DÉCIMO - CONCLUSÃO 387

1. SÍNTESE GERAL 387
2. BENEFÍCIOS 390
3. EXEQUIBILIDADE 395
3.1 Meios Humanos 395
3.2 Meios Financeiros 396
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS 397

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO1 - Selecção de resultados da pesquisa feita às Bases de Dados Water Resources Abstracts e Environment Library (Editora SilverPlatter International) sobre aplicações do método DRASTIC 399
ANEXO 2 - Resultados comentados de uma pesquisa feita à INTERNET em 17 de Março de 1999, a http://altavista.digital.com/ sobre aplicações do método DRASTIC (i.e. "groundwater DRASTIC") 401

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 407

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Resultados das análises de trítio de CEDEX (1998) 31
Quadro 2.2 - Modelo de concentração de trítio válido para precipitações médias da zona de estudo de CEDEX (1998) 32
Quadro 2.3 - Valores da recarga estimados com base no trítio para captações profundas do aquífero costeiro (espanhol) da área do estuário do rio Guadiana, estudado por CEDEX (1998) 33
Quadro 2.4 - Método de Kessler: valores da relação entre x e K para a Hungria 34
Quadro 2.5 - Método de Kessler: valores da relação relação entre u e Ir para a Hungria 34
Quadro 3.1 - Síntese dos diversos tipos de programas de monitorização de águas subterrâneas 99
Quadro 3.2 - Dados hidrogeológicos disponíveis em Março de 1999 na página do Instituto da Água na Internet http://www.inag.pt/snirh 108
Quadro 4.1 - Perímetros de protecção de captações de águas subterrâneas estabelecidos na NP 836 116

Quadro 4.2 - Síntese do grau de facilidade de reabilitação de águas subterrâneas poluídas por processos de bombagem e tratamento, em função da hidrogeologia local e do tipo de poluentes 131
Quadro 4.3 - Síntese da aplicabilidade das técnicas de reabilitação química para o tratamento in situ de águas subterrâneas 134
Quadro 5.1- Exemplos de variáveis de decisão, de restrições e de funções objectivo em águas subterrâneas 152
Quadro 5.2 - Número de estudos de cada combinação de palavras-chave 192

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 - Primeiro mapeamento integral da recarga potencial do território de Portugal Continental desenvolvido no LNEC 20
Fig. 2.2 - Representação esquemática do ciclo da água num troço de uma bacia hidrográfica com indicação das componentes utilizadas para a elaboração das equações de balanço hídrico 23
Fig. 2.3 - Características do hidrograma 24
Fig. 2.4 - Cálculo da recarga pelo método da translação da curva de esgotamento 25
Fig. 2.5 - Cálculo da recarga pelo método da decomposição do escoamento total 27
Fig. 2.6 - Exemplo de aplicação da modelação estocástica inversa para avaliação da recarga da secção norte do aquífero de Rio Maior 38
Fig. 2.7 - Mapeamento da vulnerabilidade "clássica" à poluição das águas subterrâneas de Portugal Continental 43
Fig. 2.8 - Mapeamento da vulnerabilidade à poluição desenvolvido para Portugal Continental pelo método DRASTIC por LOBO-FERREIRA e OLIVEIRA (1993), à escala 1:500 000 56
Fig. 2.9 - Mapeamento DRASTIC das formações geológicas aflorantes da região de Faro 60
Fig. 2.10 - Mapeamento DRASTIC da região de Alqueva 63
Fig. 2.11 - Mapeamento DRASTIC Pesticidas da região de Alqueva 64
Fig. 2.12 - Recarga do aquífero denominado Bacia do Tejo-Sado/Margem Esquerda 65
Fig. 2.13 - Vulnerabilidade DRASTIC do aquífero denominado Bacia do Tejo-Sado/Margem Esquerda 66
Fig. 2.14 - Vulnerabilidade DRASTIC da zona costeira de Portugal Continental 69
Fig. 2.15 - Mapeamento da vulnerabilidade à poluição DRASTIC e SEEPAGE das águas subterrâneas do estado de Indiana, EUA 71
Fig. 2.16 - Vulnerabilidade DRASTIC do condado de Tippecanoe, EUA, calculada a várias escalas 72
Fig. 2.17 - Mapeamento da vulnerabilidade à poluição DRASTIC das águas subterrâneas do Sul de África 76
Fig. 2.18 - Comparação de mapeamentos de vulnerabilidade à poluição DRASTIC, SINTACS, AVI e GOD 78
Fig. 4.1 - Esquema de barreiras hidráulicas para contenção da poluição 128
Fig. 4.2 - Exemplo esquemático, em corte vertical, da extracção de uma pluma poluente através de um sistema de bombagem 129
Fig. 4.3 - Representação de um processo de bioreabilitação aeróbia 138
Fig. 4.4 - Representação de uma galeria de infiltração para recirculação de água e de nutrientes 138
Fig. 4.5 - Biodegradação de contaminantes orgânicos da zona vadosa através da introdução de ar na zona acima da superfície saturada - *bioventing* 139
Fig. 4.6 - Biodegradação de contaminantes orgânicos por sistema de injecção de ar na zona saturada - *biosparging* 140
Fig. 5.1 - Esquema da gestão optimizada de um sistema de águas subterrâneas 151
Fig. 5.2 - Métodos de solução de equações de sistemas dinâmicos 157
Fig. 5.3 - Métodos de simulação usados para consideração da incerteza 159
Fig. 5.4 - Técnicas de programação matemática 160
Fig. 5.5 - Classificação de modelos de gestão do abastecimento por águas subterrâneas 164
Fig. 5.6 - Linhas de investigação futuras de S/O para problemas de gestão da qualidade de águas subterrâneas 190
Fig. 5.7 - Combinação das palavras-chave usadas 191
Fig. 5.8 - "Peso" da investigação sobre gestão de águas subterrâneas aplicada a problemas de poluição das águas subterrâneas comparada com toda a investigação sobre gestão de águas subterrâneas 192
Fig. 5.9 - Evolução das tendências de investigação em optimização de águas subterrâneas 193

PREFÁCIO

El volumen titulado "Inventariando, Monitorizando e Gerindo de Forma Sustentável Recursos Hídricos Subterrâneos: A Situação Portuguesa, os Desafios da União Europeia e a Globalização" ha sido preparado por el Dr. João Paulo de Cárcomo Lobo Ferreira como programa de investigación para el concurso de acceso a la categoría de Investigador Coordinador, en el Laboratório Nacional de Engenharia Civil, de Lisboa. El contenido del texto se expone sucintamente por el autor en el resumen, así como las motivaciones que lo originan. Se trata de un análisis de la situación actual y de una perspectiva de futuro, en este caso de los recursos hídricos subterráneos en Portugal. La línea temática parte de aspectos generales, para luego pasar a trabajos en Portugal y finalmente encuadrarlos en su actualidad y futuro en las líneas de los requisitos de la Unión Europea y de las prioridades de investigación de su V Programa Marco, y todo ello bajo la perspectiva de la labor de un centro nacional que entre sus empeños está la visión general del país y la creación de infraestructura de conocimiento. Muchos de esos empeños son similares a los de otros centros similares en Europa y tienen mucho en común con necesidades de conocimiento territorial del resto de la Península Ibérica y los territorios insulares asociados. Esa comunalidad es la que se deriva de una situación geográfica geológica y humana que en buena parte es común y que configura un carácter que es único del sudoeste europeo, entre el ambito Atlántico y Mediterráneo, si bien hay peculiaridades específicas de cada territorio, que el autor identifica bien en el ámbito portugués, y que en el conjunto dan una gran y atractiva diversidad del mundo ibérico dentro de una comunalidad de fondo.

La recarga a los acuíferos es un aspecto clave cuya evaluación aborda el autor, presentando la diversa metodología que permite obtener resultados desde diversos enfoques. En cualquier caso subyace una notable incertidumbre --como también sucede en cuanto a la evaluación de los recursos hídricos superficiales- cuya evaluación debe ser objeto de avances futuros para poder gestionar los recursos hídricos subterráneos y el conjunto de los recursos de agua en el contexto de incertidumbre consciente e internalizable, cuya acotación requiere avanzar en la gestión observando y controlando, que es lo que expresa el título del trabajo.

Otro aspecto clave de la conservación y gestión de los recursos hídricos subterráneos y de su papel medioambiental es el de la calidad y de la evaluación de su vulnerabilidad ante las acciones antrópicas. El concepto de vulnerabilidad es difícil de definir, como todo concepto muy general, y que puede sufrir un rápido desgaste y difuminación por su uso indiscriminado en ámbitos muy diversos y por personas muy distintas. En cualquier caso es una puesta de relieve de que uno de los grandes riesgos del uso sustentable de las aguas subterráneas en su contaminación, y para hacer llegar este mensaje a gestores y ciudadanos la cartografía de vulnerabilidad es una herramienta útil. El autor presenta varias de las metodologías existentes, las compara y las aplica al territorio. Con ello contribuye a la salvaguarda de un recurso hídrico importante, aunque en general mal entendido y poco atendido. Esto es un grave error de planificación, de oportunidad y estratégico, y puede afectar seriamente a la economía al derivar innecesariamente recursos económicos de un sector inversor a otro. En este aspecto la recién aprobada Directiva Marco del Agua, de la Unión Europea, es un reto para introducir racionalidad con la condición de que se conozca y valoren en sus justos términos los diferentes componentes del ciclo del agua. El autor dedica un capítulo a estos nuevos aspectos y la evolución de su gestación.

El desarrollo de las técnicas y políticas de uso sustentable de los acuíferos, y de sus aspectos socioeconómicos, supone no sólo un esfuerzo normativo nacional en el contexto europeo, sino la implantación de sistemas adecuados de observación y de protección de captaciones, a los que hay que añadir la protección del acuífero, de su recarga y de su calidad global, con las restricciones que se derivan del mantenimiento de aquellas funciones ambientales que la sociedad estime en cada momento que son necesarias, tras una evaluación de costes y beneficios en el ámbito del interés general. Por esta razón el autor aporta una revisión de técnicas de gestión y luego comenta la planificación hídrica nacional como marco de actuación.

Para el que está interesado en conocer la labor hidrogeológica desarrollada en Portugal Continental e Insular es interesante la recopilación de información que aporta el autor. Esta recopilación reúne datos que son difíciles de encontrar en otros lugares y da una buena perspectiva del progreso científico-tecnológico.

Aunque estos comentarios no siguen el orden de contenido en el texto ni recogen todos los aspectos, han tratado de enmarcar el trabajo de síntesis y reunión de información del autor, que en más de 400 páginas ha reunido un amplio conjunto temático, con figuras de interés general, y un catálogo de iniciativas nacionales e internacionales en la línea de altura y seriedad que siempre ha caracterizado al hacer del LNEC, uno de cuyos más activos miembros es el autor del texto, que es persona de cultura universal, entrañable amigo e inquieto promotor de actividad.

Emilio Custodio, Dr. I.I.
Catedrático de Hidrología Subterránea, DIFUSC.
Director del Instituto Tecnológico Geominero de España (Madrid)

Agradecimentos

A realização de um trabalho com as características do que se apresenta só se torna possível com o trabalho dedicado, e com a experiência e brio profissional de numerosas pessoas. Gostaria de lhes expressar o meu profundo agradecimento.

Em condições aparentemente adversas de escassez de tempo para a realização deste trabalho, gostaria de realçar as excelentes condições que me foram proporcionadas pelo Chefe do Departamento de Hidráulica, Eng. Jaime Melo Baptista, e pelo notável desempenho de todos os elementos do GIAS, ao longo destes últimos oito anos.

Agradeço aos Eng. Emanuele Migliari e Piercarlo Ciabatti (e pelo apoio financeiro à Comissão Europeia, que através dos Programas LEONARDO e Human Capital and Mobility (HCM), TechWare e TechWare-Itália, permitiu os seus estágios), colegas e amigos, que comigo desenvolveram a sua actividade no GIAS, o que permitiu a concretização da investigação de suporte à elaboração dos Capítulos Terceiro e Quinto (componente internacional). De igual modo agradeço à Prof. Maria da Conceição Cunha, da Universidade de Coimbra, à Doutora Teresa Eira Leitão e ao Dr. Manuel de Oliveira o suporte para a elaboração, respectivamente dos Capítulos Quinto (componente nacional), Quarto e Segundo. Agradeço-lhes as reflexões que comigo tiveram sobre a base, a consistência e a exequibilidade dos correspondentes projectos propostos no Capítulo Nono. Estendo este último agradecimento à Dra. Emília Novo e Dra. Maria João Moinante, que igualmente fez a revisão dactilográfica deste texto. Agradeço também à Técnica e *licencianda* Maria José Henriques todo o trabalho de digitalização e composição de numerosas figuras deste trabalho.

Ao Director cessante do LNEC, Prof. E. Romano de Arantes e Oliveira, e ao actual Director Eng. Rui Correia, notáveis peritos em modelação matemática, agradeço as excelentes condições, no seu conjunto, proporcionadas pelo LNEC ao desenvolvimento das actividades científicas do GIAS, desde 1990, e, assim, implicitamente à realização deste trabalho.

Expresso o meu agradecimento ao Grupo de Hidroinformática (GHi) do DH e ao Centro de Informática do LNEC, em nome dos seus Chefes, respectivamente, Dra. Maria Alzira Santos e Eng. João Cunha, pela disponibilização de meios informáticos potentes e actuais, que em conjunto com a acção e apoio *on-line* dos elementos do GHi Dr. João Leal, Dr. João Palha Fernandes e Carlos Galvão permitiu a concretização deste trabalho em tempo útil.

Agradeço todo o apoio prestado pelo pessoal de secretariado do DH, em especial à Sra. D. Maria do Carmo Martina, que efectuou todo o trabalho de preparação das publicações apresentadas ao concurso. À Sra. D. Maria Luísa do Nascimento, Chefe da Secretaria do DH e à Sra. D. Maria José Cavaca agradeço a disponibilidade e satisfação das solicitações por mim efectuadas neste período.

Cientificamente, só foi possível a realização deste Programa pela escola criada pelos meus grandes mestres, a quem cientificamente dedico este trabalho, Fernando Abecasis, Jacob Bear, Hans Bretschneider, Luís Veiga da Cunha, Emilio Custodio, Gedeon Dagan, Rudolf Damrath, Lobo Fialho, Steven Gorelick, Peter Huyakorn, Leonardo Konikow, Fernando Oliveira Lemos, Alberto Abecasis Manzanares, Ghislain de Marsily, António Quintela, José Delgado Rodrigues, Luís Valadares Tavares e Francisco Tilak Viegas (por ordem alfabética). Com a sua visão iluminada mostraram-me o caminho a seguir e moldaram, directa ou indirectamente, científica e humanamente, o barro que hoje sou e a *escola do GIAS*.

Tenho no coração a amizade e os notáveis desempenhos científicos e técnicos do Jaime Melo Baptista, do João Bau, do Francisco Nunes Correia e do Mário Lino (por ordem alfabética). Agradeço-lhes o empenho, o estímulo e a confiança que sempre me deram para a criação do GIAS e para o lançamento e sucesso da Presidência da Comissão Directiva da APRH do biénio 1992/94.

A meus Pais agradeço o *transporte do piano*, durante o período de elaboração deste Programa de Investigação, pela sua constante dedicação aos netos.

-Ah! disse ao principezinho, ... E já não tenho nada para beber e também eu seria feliz se pudesse dirigir-me lentamente a uma fonte!

-Também tenho sede... procuremos um poço ...

Tive um gesto de desânimo: é absurdo procurar um poço, ao acaso, na imensidão do deserto. No entanto começámos a andar...

-O que torna belo o deserto, disse o principezinho, é que ele esconde um poço em qualquer lado...

E, assim caminhando, descobri o poço ao nascer do dia. ...

Lentamente icei o balde até ao bocal do poço. E pu-lo ali bem a prumo. Nos meus ouvidos prolongava-se o canto da roldana e na água que tremia ainda, via tremer o sol.

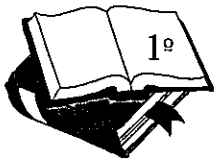
-Tenho sede desta água, disse o principezinho, dá-me de beber...

... Ele bebeu, de olhos fechados. Era suave como uma festa. Aquela água era bem mais do que um alimento...

(de O Pricipezinho, de Antoine de Saint-Exupéry)

Dedico este trabalho a ti Teresa, que tão bem reacendeste a centelha da minha felicidade e à *criança* dos nossos queridos *lobinhos*
André e Bernardo

CAPÍTULO PRIMEIRO



APRESENTAÇÃO GERAL

1. INTRODUÇÃO

Este livro, publicado na série ***Teses e Programas de Investigação*** do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, foi originalmente apresentado em LOBO-FERREIRA (1999) visando dar cumprimento ao estipulado no N.º 8.2, alínea b), do Aviso N.º 17 428/98 (2ª série) *Concurso de acesso a Investigador Coordenador do Laboratório Nacional de Engenharia Civil,*

publicado no Diário da República - II Série, N.º 256, de 5 de Novembro de 1998, constituindo:

"... uma síntese dos conhecimentos existentes sobre o tema a tratar, uma apresentação crítica dos problemas já tratados e dos problemas em aberto e um plano de estudos relativo a alguns desses problemas."

O plano de estudo citará *a metodologia proposta, o planeamento dos meios necessários, os objectivos a atingir e os benefícios operados da sua realização.*

2. TEMA DO PROGRAMA DE INVESTIGAÇÃO

Para o Programa de Investigação do *Concurso de acesso a Investigador Coordenador do Laboratório Nacional de Engenharia Civil* foi seleccionado o tema **Inventariando, Monitorizando e Gerindo de Forma Sustentável Recursos Hídricos Subterrâneos - A Situação Portuguesa, os Desafios da União Europeia e a Globalização.** Com o trabalho que se apresenta pretende-se contribuir para uma melhor sustentação científica no domínio dos **Recursos Hídricos Subterrâneos**, incorporando *criticamente* o vasto conhecimento já adquirido no País.

Na secção seguinte apresenta-se o contexto actual, justificativo da escolha feita.

3. CONTEXTO ACTUAL

Em 10 de Julho de 1996, a Comissão Europeia adoptou o **Programa de Acção para a Protecção e a Gestão Integrada das Águas Subterrâneas** (*Action Programme for Integrated Groundwater Protection and Management* ou GAP). O GAP pretende dar um importante passo para fortalecer a política da água na União Europeia. Como principal linha de força, o GAP requer a cada Estado-Membro que programe acções nacionais, de acordo com as acções acordadas e aprovadas em conjunto, e que as implementem até ao ano 2000, **ajustando-as às situações particulares das regiões da União.**

Os programas nacionais deverão incluir a caracterização e o mapeamento dos recursos hídricos subterrâneos, e a identificação das fontes de poluição urbana, industrial e agrícola.

O GAP enfatiza a importância da protecção das águas subterrâneas, incluindo a necessidade da designação de zonas onde as águas subterrâneas são particularmente importantes ou estão particularmente ameaçadas. Recomenda ainda o incremento da monitorização quantitativa e qualitativa das águas subterrâneas.

No Workshop realizado em Lisboa, a 28 de Janeiro de 1997, intitulado *O Programa Quadro e a Investigação no Domínio Ambiente e* ***Água***, que contou com a participação de cerca de quarenta investigadores, foram analisadas e discutidas quatro áreas principais de investigação: ***recursos hídricos***, *saneamento básico*, *água e agricultura* e *ambiente e indústria e a importância das ciências sociais e humanas*. Na Internet, em http://www-dh.lnec.pt/gias/estudos/tfew.html apresenta-se o "*Executive Summary*" do Relatório "*Task Force Environment Water: Portuguese Contribution*", contendo o consenso obtido sobre as linhas de investigação prioritárias. Em relação às ***águas subterrâneas*** foram apresentados para discussão os seguintes temas:

(a) Preservação e reabilitação da qualidade das águas subterrâneas

(b) Gestão integrada dos aquíferos e das bacias hidrográficas

(c) Gestão optimizada de aquíferos

(d) A recarga artificial na regeneração de aquíferos contaminados e na gestão de recursos hídricos

(e) Recursos hídricos subterrâneos renováveis: avaliação e calibração

(f) Avaliação económica das políticas de controle de poluição de águas subterrâneas

Salienta-se que de entre a mais de meia centena de temas discutidos no Workshop sobre *Recursos Hídricos*, o tema **Preservação e reabilitação da qualidade das águas subterrâneas** foi classificado como o quarto mais relevante para financiamento comunitário (i.e. *top priority research areas*). As preocupações relativas à preservação e reabilitação da qualidade das **águas subterrâneas portuguesas** passaram assim (a nível nacional) a ter a dimensão e a importância manifestada implícita ou explicitamente na mais de meia centena de comunicações apresentadas durante o "4º Congresso da Água", organizado pela Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos (APRH) em Março de 1998, ao Tema 5 sobre **Águas Subterrâneas**.

Por outro lado a nova Directiva-Quadro da Água (cf. *COUNCIL DIRECTIVE establishing a framework for Community action in the field of water policy, Brussels 26.02.1997, COM (97)*

49 final 97/0067, SYN) reforça a necessidade de acção no domínio dos **recursos hídricos subterrâneos**, indicando como objectivos de uma gestão sustentável dos recursos hídricos os seguintes:

The four main objectives of a sustainable water policy are:

- *the provision of drinking water;*
- *the provision of water for other economic requirements;*
- *the protection of the environment; and*
- *the alleviation of the impact of floods and droughts.*

No Artigo 4 da nova Directiva-Quadro, sobre "Objectivos Ambientais", especifica-se:

Member States shall draw up and make operational within a comprehensive ***River Basin Management Plan*** *the programmes of measures envisaged as necessary, in order to:*

(a) prevent deterioration of ecological quality and pollution of surface waters and restore polluted surface waters, in order to achieve good surface water status in all surface waters by 31 December 2010;

(b) ***prevent deterioration of groundwater quality, restore polluted groundwater, and ensure a balance between abstraction and recharge of groundwater, in order to achieve good groundwater status in all groundwaters by 31 December 2010****; and*

(c) *comply with all standards and objectives relating to Protected Areas by 31 December 2010, unless otherwise specified in the Community, national or local legislation under which the individual Protected Areas have been established.*

Em Portugal Continental, com a elaboração (e concretização até ao ano 2000) dos **Planos de Bacia** (cf. http//www.inag.pt/snirh/plano/plano_frame.html) e ainda do **Plano Nacional da Água**, espera-se que a resposta portuguesa seja atempada e (certamente) de qualidade, cumprindo o requerido, temporalmente, na *Directiva-Quadro da Água*:

- ***Dec. 2003*** *- Draft River Basin Management Plans published (Article 17);*
- ***Dec. 2004****- River Basin Management Plans published covering 2005-2010 (Article 16).*

4. ORGANIZAÇÃO DO PROGRAMA DE INVESTIGAÇÃO

No **Capítulo Segundo** apresenta-se uma selecção de metodologias necessárias ao desenvolvimento de inventários de recursos hídricos subterrâneos. A elaboração desses inventários requer o domínio de áreas específicas da hidrogeologia e da matemática aplicada à engenharia civil. Os estudos de investigação programada, aplicada ou por contrato, já desenvolvidos ou em desenvolvimento a nível nacional, comunitário ou internacional, sobre métodos de avaliação da **recarga de aquíferos** e sobre métodos de avaliação da **vulnerabilidade à poluição** de águas subterrâneas, são revistos no Capítulo Segundo. Os estudos de base para elaboração desse Capítulo inseriram-se (1) no Projecto de Investigação Programada do Laboratório Nacional de Engenharia Civil intitulado **Recursos Hídricos Subterrâneos Renováveis: Avaliação e Calibração**, Proc. 607/11/13100, em curso no LNEC.DH.GIAS, em 1999, nos estudos subjacentes ao (2) **Desenvolvimento de um Inventário das Águas Subterrâneas de Portugal**, apresentados em LOBO-FERREIRA *et al.* (1995a, b, c) e ao (3) **Mapeamento das Águas Subterrâneas da Faixa Costeira Litoral e da Vulnerabilidade dos seus Aquíferos à Poluição**, apresentados em LOBO-FERREIRA *et al.* (1995d).

No **Capítulo Terceiro** apresentam-se estudos de investigação programada, aplicada ou por contrato, recentemente desenvolvidos ou em desenvolvimento a nível nacional, comunitário ou internacional, sobre **monitorização de águas subterrâneas**. A base para elaboração deste capítulo inseriu-se nos estudos subjacentes aos Projectos de Investigação Comunitária, para a DGXII (Investigação) intitulado **Requirements for Density, Sampling Frequency, Data Storage and Estimate Costs of Groundwater Quantity Monitoring**, apresentados em LOBO-FERREIRA *et al.* (1995e) e para a DGXI (Ambiente) intitulado **Evaluation of the Costs of Groundwater Inspection in the Member States**, apresentados em LOBO-FERREIRA *et al.* (1996).

No **Capítulo Quarto** desenvolve-se o tema da **protecção e reabilitação de aquíferos**. O estudo de base para elaboração deste capítulo inseriu-se no Projecto de Investigação Programada do Laboratório Nacional de Engenharia Civil intitulado "Preservação e Reabilitação da Qualidade das Águas Subterrâneas", Proc. 607/11/13098, em curso no LNEC.DH.GIAS, em 1999. Nesse Capítulo apresenta-se uma súmula das principais tecnologias disponíveis para a contenção da poluição e para a reabilitação de aquíferos poluídos, e os aspectos mais relevantes a considerar para a protecção de captações

subterrâneas, com base, respectivamente, nos trabalhos desenvolvidos por LEITÃO (1997) e por LOBO-FERREIRA e CIABATTI (1996).

No **Capítulo Quinto** desenvolve-se o tema da **gestão optimizada de aquíferos.** O estudo de base inseriu-se no Projecto de Investigação Programada do Laboratório Nacional de Engenharia Civil intitulado "Gestão Optimizada de Aquíferos", Proc. 607/11/13098, em curso no LNEC.DH.GIAS, em 1999. Visa-se a apresentação de metodologias apropriadas para avaliação e exploração optimizada de recursos hídricos subterrâneos. O capítulo foi dividido em duas partes. Na Parte I apresentam-se conceitos básicos da gestão de águas subterrâneas, aprofundando-se o enquadramento conceptual "simulação/optimização". Na Parte II do Capítulo Quinto, como resultado da pesquisa bibliográfica desenvolvida, apresenta-se o estado-da-arte da simulação/optimização (a nível internacional) para o planeamento e a gestão do abastecimento por águas subterrâneas, tendo-se focado em especial a modelação que integra a componente qualidade das águas subterrâneas.

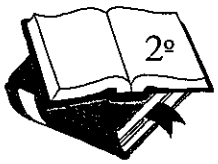
O **Capítulo Sexto** foi dividido em duas partes. Na Parte I apresenta-se, com base na síntese de LOBO-FERREIRA (1998), um relato dos **estudos desenvolvidos em Portugal** de âmbito "Temático", apresentados durante o "Seminário sobre Águas Subterrâneas", organizado pela Associação Portuguesa dos Recursos (APRH), em Dezembro de 1997, e durante o "4º Congresso da Água", também organizado pela APRH, em Março de 1998, onde foram discutidas mais de meia centena de comunicações no Tema 5 do Congresso sobre "Águas Subterrâneas". Na Parte II do Capítulo Sexto complementa-se o relato com a apresentação de estudos de carácter "Regional", também discutidos durante os referidos Seminário e Congresso.

O **Capítulo Sétimo** foi dividido em duas partes. Na Parte I apresentam-se as grandes linhas das acções comunitárias, os objectivos científicos e tecnológicos e as **prioridades da investigação comunitária no domínio das águas subterrâneas**, definidos pelo Conselho da União Europeia de 12 de Janeiro de 1999. Na Parte II do Capítulo Sétimo, apresentam-se as discussões, conclusões e recomendações para acções comunitárias de investigação concretizáveis em projectos ou em acções concertadas de investigação. Destacam-se as acções que contaram com a colaboração do autor sobre prioridades da investigação comunitária no domínio da água, que permitem focar, a nível da Europa, as linhas de investigação mais carenciadas no domínio dos recursos hídricos subterrâneos.

O **Capítulo Oitavo** foi dividido em duas partes. Na Parte I desenvolve-se o tema da **afirmação do papel internacional da investigação comunitária no domínio das águas subterrâneas**, destacando-se as prioridades definidas pelo Conselho da União Europeia, de 12 de Janeiro de 1999. Na Parte II apresentam-se as discussões, conclusões e recomendações para acções comunitárias de projectos de investigação ou de acções concertadas de investigação. Destacam-se as acções que contaram com a colaboração do autor sobre o tema internacionalização, que permitem focar a nível global, as linhas de investigação mais carenciadas no domínio dos recursos hídricos subterrâneos.

Finalmente, e dando razão de ser a este Programa de Investigação, o **Capítulo Nono** é dedicado à **apresentação de um *Plano de Estudos*** integrado por **doze projectos de Investigação Programada.** Visando uma consciencialização clara das necessidades de investigação não só nas áreas "Temáticas", desenvolvidas nos capítulos Segundo ao Quinto, mas também de um ponto de vista "Regional", em acordo com as linhas de acção apresentadas nos capítulos Sexto ao Oitavo, **apresenta-se no Capítulo Nono uma síntese de rescensões críticas, complementares, que integram estudos que claramente indiciem ou apontem reservas e limitações aos métodos revistos.** Assim, fundamenta-se melhor este Programa de Investigação, que visa (1) contribuir para uma melhor sustentação científica no domínio dos **Recursos Hídricos Subterrâneos**, incorporando *criticamente* o vasto conhecimento já adquirido no País; (2) contribuir para um melhor conhecimento sobre os temas de investigação na União Europeia, visando o reforço das actividades nacionais de investigação, em recursos hídricos subterrâneos, no contexto actual de vontade política de incrementar a acção portuguesa de investigação na Europa; e (3) contribuir para um melhor conhecimento nacional sobre o tema da internacionalização além União Europeia, visando o reforço das actividades nacionais de investigação em recursos hídricos subterrâneos aplicados ao contexto actual e pretendido de globalização e afirmação do papel internacional da investigação comunitária.

CAPÍTULO SEGUNDO



RECARGA DE AQUÍFEROS E AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE À POLUIÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Resumo do Capítulo

Neste capítulo apresenta-se uma selecção de metodologias necessárias ao desenvolvimento de inventários de recursos hídricos subterrâneos. A elaboração desses inventários requer o domínio de múltiplas áreas específicas das ciências geológica e da engenharia, nomeadamente a hidrogeologia e a matemática.

Revêem-se neste Capítulo, estudos de investigação programada, aplicada ou por contrato, recentemente desenvolvidos ou em desenvolvimento a nível nacional, comunitário ou internacional, sobre a avaliação da **recarga de aquíferos** e sobre a avaliação da **vulnerabilidade à poluição** de águas subterrâneas. Os estudos de base para elaboração deste capítulo inseriram-se (1) no Projecto de Investigação Programada do Laboratório Nacional de Engenharia Civil intitulado **Recursos Hídricos Subterrâneos Renováveis: Avaliação e Calibração**, Proc. 607/11/13100, em curso em 1999 no LNEC.DH.GIAS, e nos estudos subjacentes ao (2) **Desenvolvimento de um Inventário das Águas Subterrâneas de Portugal**, apresentados em LOBO-FERREIRA *et al.* (1995a, b, c), ao (3) **Mapeamento das Águas Subterrâneas da Faixa Costeira Litoral e da Vulnerabilidade dos seus Aquíferos à Poluição**, apresentados em LOBO-FERREIRA *et al.* (1995d), e (4) ao estudo da **Cartografia Automática da Vulnerabilidade de Aquíferos com Base na Aplicação do Método DRASTIC**, apresentados em OLIVEIRA *et al.* (1997a).

RECARGA DE AQUÍFEROS E AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE À POLUIÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresenta-se uma selecção de metodologias necessárias ao desenvolvimento de inventários de recursos hídricos subterrâneos. A elaboração desses inventários requer o domínio de numerosas áreas multidisciplinares, de que se destacam, no âmbito dos trabalhos deste Programa de Investigação, a hidrogeologia e a matemática aplicada à engenharia civil.

Neste capítulo destacam-se estudos de investigação programada, aplicada ou desenvolvida por contrato, recentemente concluídos ou em curso a nível nacional, comunitário ou internacional, sobre a avaliação da **recarga de aquíferos** e sobre a avaliação da **vulnerabilidade à poluição de águas subterrâneas.**

Os estudos de base para elaboração deste capítulo inseriram-se (1) no Projecto de Investigação Programada do Laboratório Nacional de Engenharia Civil intitulado **Recursos Hídricos Subterrâneos Renováveis: Avaliação e Calibração**, Proc. 607/11/13100, em curso em 1999 no LNEC.DH.GIAS, e nos estudos subjacentes ao (2) **Desenvolvimento de um Inventário das Águas Subterrâneas de Portugal**, apresentados em LOBO-FERREIRA *et al.* (1995a, b, c), ao (3) **Mapeamento das Águas Subterrâneas da Faixa Costeira Litoral e da Vulnerabilidade dos seus Aquíferos à Poluição**, apresentados em LOBO-FERREIRA *et al.* (1995d), e (4) ao estudo da **Cartografia Automática da Vulnerabilidade de Aquíferos com Base na Aplicação do Método DRASTIC**, apresentados em OLIVEIRA *et al.* (1997a).

Está em curso, em Portugal Continental, a elaboração de um conjunto de dezassete Planos de Bacia Hidrográfica. O LNEC.DH.GIAS tem a responsabilidade de elaboração da componente "Águas Subterrâneas" dos seguintes Planos de Bacia Hidrográfica: rio Minho, rio Tejo (*cf.* LOBO-FERREIRA *et al.*, 1999), ribeiras do Oeste, rio Sado e rio Mira. Os planos em elaboração (até finais do ano 2000), deverão ser revistos de acordo com as normas comunitárias, para os tornar compatíveis com os estudos em curso ou a iniciar, nos restantes Estados-Membros. Este capítulo visa rever conhecimentos, de forma a permitir o reforço da

base científica dos referidos Planos de Bacia Portugueses, facilitando a detecção de áreas onde há carências de investigação em relação aos temas avaliação da **recarga de aquíferos** e avaliação da **vulnerabilidade à poluição de águas subterrâneas.**

Pretende-se ainda, verificar onde possa haver especificidades portuguesas não consideradas na legislação comunitária, nomeadamente no *Plano de Acção Integrada dos Recursos Hídricos Subterrâneos*, e na *Lei-Quadro da Água*, documentos aprovados pelo Conselho da União Europeia, respectivamente em 1997 e em 1998.

2. METODOLOGIAS DE ANÁLISE DA RECARGA DE AQUÍFEROS

2.1 Considerações Gerais

Uma revisão bibliográfica sobre métodos de análise da recarga de aquíferos foi desenvolvida por OLIVEIRA e LOBO-FERREIRA (1994). Neste capítulo apresenta-se um extracto desse estudo, nos seus aspectos considerados mais importantes para a elaboração deste Programa de Investigação. A revisão é completada com uma análise de resultados de estudos desenvolvidos nos últimos cinco anos (*i.e.* 1994/99).

A determinação da recarga de aquíferos constitui um dos passos mais importantes da caracterização hidrogeológica, quer quantitativa quer qualitativa. A recarga corresponde à renovação das reservas hídricas subterrâneas dos aquíferos. Se um aquífero estiver a ser correctamente explorado, a sua recarga natural compensa as extracções, evitando que as reservas de água subterrânea diminuam ao longo do tempo, chegando, eventualmente, ao esgotamento. A recarga de aquíferos constitui também uma importante via de transporte de eventuais poluentes existentes na zona não-saturada do solo, originados por múltiplas actividades humanas, quer a nível agrícola quer industrial e mesmo doméstica. Valores significativos de recarga podem, por outro lado, favorecer a diluição de concentrações elevadas de produtos ou elementos nocivos, resultantes de processos poluentes anteriores.

A avaliação da recarga pode ser (conceptualmente) dividida em diversas fases de análise. Pode-se assim definir vários tipos de recarga, dos quais se destacam a recarga por infiltração directa de água superficial, existente por exemplo ao longo de rios e lagos, a recarga por fluxo subterrâneo e a recarga por infiltração directa e profunda da água da chuva. A recarga de um

aquífero por fluxo subterrâneo resulta da descarga lateral de um aquífero adjacente, fazendo-se à custa das suas reservas, por exemplo por drenância de um aquífero subjacente. Por sua vez, a recarga deste aquífero adjacente foi originada quer pela infiltração directa profunda de águas das chuvas quer por infiltração a partir da superfície. A recarga de aquíferos por infiltração directa (profunda) da água da chuva é o processo de recarga mais importante.

A recarga por água da chuva depende essencialmente do valor absoluto da pluviosidade e do seu regime de precipitação (intensidade), do tipo de solo (porosidade, material constituinte, taxa de infiltração), do teor de humidade do solo (função de episódios de precipitações anteriores), do uso do solo que o pode tornar mais ou menos impermeável, da cobertura vegetal que vai condicionar a evapotranspiração, do meio rochoso por onde a água circula antes de atingir o aquífero, e, finalmente, das características do aquífero (porosidade eficaz, condutividade hidráulica, espessura, etc.).

Em função dos diversos factores apresentados verifica-se que a recarga varia espacial e temporalmente. A recarga regional ao longo de um ano e de ano para ano, pode variar de zero a valores muito elevados, devendo-se esta variação fundamentalmente à quantidade e à distribuição temporal da precipitação.

2.2 Métodos de Avaliação da Recarga de Aquíferos

2.2.1 Considerações Gerais

Existem vários processos para determinar o valor de recarga de aquíferos, dos quais se referem os seguintes:

- balanços hídricos sequenciais;
- análise de hidrogramas;
- balanço de cloretos;
- balanço de trítio;
- métodos empíricos;
- análise de variação de níveis freáticos ou piezométricos;
- aplicação da lei de Darcy numa secção do aquífero;
- controlo de caudais de nascentes.

Todos estes métodos têm sido, com maior ou menor frequência, utilizados em Portugal para quantificar a recarga de aquíferos. Os balanços hídricos sequenciais caracterizam-se por considerarem todas as variáveis que condicionam a recarga, permitindo mesmo considerar a recarga por fluxo lateral. Têm no entanto a desvantagem da difícil quantificação de algumas das variáveis regionais que influem no processo da recarga, como por exemplo a caracterização actualizada do uso do solo.

Os métodos empíricos ou semi-empíricos analíticos utilizam expressões matemáticas que pretendem explicar de uma forma mais ou menos explícita os diversos processos ocorrentes durante a recarga. O mais simples consiste em atribuir um índice de infiltração a cada tipo litológico, obtendo-se a recarga pela multiplicação desse índice pela precipitação. Outros métodos empíricos baseiam-se em relações entre diferentes variáveis do ciclo hidrológico. Por exemplo Kessler, relaciona a infiltração em calcários carsificados na Hungria com a precipitação e o regime de precipitação. Num método original desenvolvido no LNEC (*cf.* LOBO-FERREIRA e OLIVEIRA (1993b), e VERMEULEN *et al.*, 1993 e 1994), que se apresenta em pormenor em OLIVEIRA e LOBO-FERREIRA (1994), relacionam-se todas as variáveis regionais do balanço hídrico, obtendo-se a partir da precipitação média anual a recarga média anual.

Nas secções seguintes apresenta-se uma revisão de métodos disponíveis para avaliação da recarga de aquíferos.

2.2.2 Balanço Hídrico

2.2.2.1 Equação do Balanço Hídrico

De acordo com CUSTODIO e LLAMAS (1976), a equação de balanço hídrico duma determinada região pode expressar-se por:

$$P + Q_{se} + Q_{te} - ETR - Q_{ss} - Q_{ts} - dS = \varepsilon \qquad (1)$$

onde P é a precipitação, Q é o caudal (o índice s refere-se a superficial, t a subterrâneo, o segundo índice e a entrada e s a saída), ETR é a evapotranspiração real, dS é a variação do armazenamento de água (final - inicial) e ε é o erro de cálculo do balanço.

Alguns destes termos podem-se desprezar se o seu valor for zero ou muito pequeno, podendo

desdobrar-se noutros valores que considerem diferentes entradas e saídas, vários aquíferos, várias formas de armazenamento, etc. Num sistema de grandes dimensões Q_{te} e Q_{ts} podem ser muito pequenos e por isso podem-se desprezar.

Se se considerar uma bacia hidrográfica e hidrogeológica, os termos Q_{se} e Q_{te} podem-se desprezar. Considerando ε a tender para zero, chega-se assim a uma equação simplificada do balanço hídrico:

$$P - ETR - Q_{ss} - Q_{ts} - dS = 0 \qquad (2)$$

Esta expressão é utilizada para a execução de balanços hídricos **sequenciais**, dos quais o mais divulgado é o de Thornthwaite e Matter. O parâmetro dS contém a variação de armazenamento à superfície (dS_s), no solo (dS_{so}) e no aquífero (dS_l). Se não houver zonas de armazenamento de água superficiais (lagos, lagoas e albufeiras) o termo dS_s pode-se desprezar.

Para a aplicação sequencial desta expressão é necessário conhecer os valores de P e de evapotranspiração potencial (ETP) referidos a cada um dos intervalos de tempo e do valor de reserva máxima de água no solo utilizável pelas plantas, que se definiu em LOBO-FERREIRA (1982a) como AGUT:

$$AGUT = n_u \,.\, r_p \qquad (3)$$

onde n_u é a capacidade utilizável (correspondente à diferença entre o valor da retenção específica e o da humidade higroscópica) e r_p é a profundidade das raízes das plantas.

A evapotranspiração real (ETR) será igual à potencial (ETP) quando não houver limitações de água para o fenómeno (isto é, P + água armazenada no solo $\geq ETP$), e será igual a P + água armazenada no solo quando houver limitações de água para o fenómeno.

A variação de água no solo é calculada por:

$$dS_{so} = P - ETR \qquad (4)$$

O valor máximo de água armazenada no solo é $AGUT$ e o valor mínimo é zero (correspondente ao teor de humidade higroscópica do solo).

Quanto aos restantes termos da equação ($Q_{ss} + Q_{ts} + dS_l + dS_s$), o seu valor pode ser determinado em conjunto.

A recarga de aquíferos (I), admitindo as simplificações subjacentes à expressão (2), é dada

pela expressão:

$$I = P - ETR - dS_{so} - Q_{ss} \quad (5)$$

ou seja considera-se como recarga toda a água que precipita e que não é evapotranspirada, que não preenche a capacidade de armazenamento do solo, nem se escoe superficialmente. Por outra definição, a recarga (I) é a água que escoa subterraneamente (Q_{ts}) acrescida da variação de água nos aquíferos (dS_t).

Em Portugal, tem sido aplicado o balanço sequencial mensal ao nível do solo para calcular os excedentes hídricos, considerando que não há variações de água armazenada à superfície (lagos, lagoas e albufeiras). O processo para fazer este balanço encontra-se bem descrito em diversa bibliografia nacional, como por exemplo em LOBO-FERREIRA *et al.* (1981) e em ALMEIDA (1985). Assim, para cada mês:

- verifica-se se a precipitação mensal é superior à evapotranspiração potencial;
- no caso afirmativo a evapotranspiração real iguala a potencial e o excesso de precipitação (P - ETP) vai aumentar a reserva de água no solo. Verifica-se seguidamente se o referido excesso de precipitação adicionado à reserva herdada do mês anterior excede $AGUT$. Se tal acontecer, o excedente vai alimentar o escoamento total, passando para o mês seguinte a reserva de água no solo, com o seu valor máximo ($AGUT$);
- se a precipitação no mês for inferior à evapotranspiração potencial verifica-se se aquela, juntamente com a reserva herdada do mês anterior, igualam ou excedem a evapotranspiração potencial. Se isso se verificar, a evapotranspiração real iguala a potencial passando como reserva de água no solo para o mês seguinte a diferença entre a reserva existente no início desse mês e a água que foi cedida por essa reserva para a evapotranspiração;
- se a precipitação juntamente com a reserva herdada for inferior à evapotranspiração potencial, então a evapotranspiração real é igual à precipitação mais a reserva de água no solo e esta fica esgotada.

Através deste balanço sequencial obtém-se o excedente hídrico ou escoamento total. Para a recarga de aquíferos é pois importante separar as componentes do escoamento total. Este é composto por três parcelas: o escoamento superficial (ou directo), o escoamento hipodérmico (ou intermédio) e o escoamento profundo (ou de base). Embora seja este último que constitui

a recarga de aquíferos, a nível de cálculo aceita-se por vezes como recarga o somatório do escoamento hipodérmico e do profundo, na medida em que ambos se processam abaixo da camada de solo.

2.2.2.2 Balanço Hídrico Sequencial Diário

Na maioria dos casos tem-se aplicado em Portugal o balanço sequencial mensal com o intuito de determinar o escoamento total e não o escoamento profundo (recarga).

No entanto, a aplicação deste método só é válida quando o regime de precipitação é uniforme ao longo do mês. Mas a precipitação mensal pode ser sempre inferior à evapotranspiração potencial mensal e, neste caso, nunca há escoamento. Na realidade, durante o período de um mês, o valor da precipitação pode ser muito elevado nuns dias e nulo noutros. Isto significa que, se se considerar um período de tempo mais curto, nesse período a precipitação pode ser superior à ETP e, neste caso, gera-se escoamento. A modelação do balanço sequencial diário permite normalmente incorporar estes fenómenos de situações extremas enquanto que na modelação sequencial mensal estes fenómenos vêm bastante atenuados. Foi precisamente a constatação deste problema que motivou a concepção e programação no LNEC.DH.NHHF do modelo matemático de balanço hídrico sequencial diário BALSEQ, para avaliação da recarga dos aquíferos da ilha (de clima semi-árido) de Porto Santo (*cf.* LOBO-FERREIRA (1981) e LOBO-FERREIRA *et al.*, 1981). O modelo foi posteriormente aplicado a outras regiões portuguesas (*cf.* por exemplo LOBO-FERREIRA (1981, 1982a, 1982b), LOBO-FERREIRA e DELGADO-RODRIGUES (1988), LOBO-FERREIRA (1991), LOBO-FERREIRA e OLIVEIRA (1993a) e NOVO *et al.*, 1994a).

O modelo BALSEQ baseia-se no cálculo da equação do balanço hídrico, utiliza um incremento de tempo diário e calcula o escoamento superficial utilizando a seguinte expressão (*cf.* LOBO-FERREIRA, 1981b):

$$P_u = 25{,}4\ (P/25{,}4 - 200 / NC + 2\ )^2 / (P / 25{,}4 + 800 / NC - 8) \qquad (6)$$

Os elementos necessários para a execução deste modelo são a precipitação diária, a evapotranspiração potencial mensal, o número característico do escoamento (NC), o valor de AGUT e o teor de humidade no solo no primeiro dia de balanço.

O funcionamento do modelo resume-se da seguinte forma (LOBO-FERREIRA e OLIVEIRA, 1993):

- se a precipitação diária for inferior à precipitação mínima necessária para que haja escoamento P_{min}, de acordo com a seguinte expressão

$$P(mm) > 5080 / NC - 50.8\ (mm) \quad (7)$$

a precipitação diária será totalmente adicionada ao valor de humidade do solo, sendo evapotranspirada em seguida até ao valor máximo da evapotranspiração diária;

- se a precipitação diária for superior à precipitação mínima necessária para haver escoamento (*cf.* Eq. 7) o escoamento superficial P_u é calculado de acordo com a Eq. (6) e o restante volume de precipitação vai satisfazer as necessidades diárias da evapotranspiração, aumentando com o remanescente o valor da humidade no solo;

- a recarga profunda ocorre sempre que a humidade do solo excede o valor inicialmente calculado para a variável AGUT. O excesso de água constituirá o valor de recarga do aquífero.

O programa considera NC invariável ao longo do tempo e fornece um valor de recarga, que **deve ser considerada potencial**, na medida em que admite que o nível freático se encontra sempre abaixo do solo e não considera a possível existência de camadas menos permeáveis na zona vadosa. Quantifica-se a recarga (potencial) de aquíferos considerando um tempo de permanência da água infiltrada abaixo do solo de pelo menos 1 dia. Após esse tempo (mínimo) de permanência nas formações geológicas a água (subterrânea) pode emergir de novo à superfície, indo alimentar cursos de água ou nascentes.

2.2.2.3 Aplicação Regional do Modelo BALSEQ

VERMEULEN *et al.* (1993 e 1994) desenvolvem um novo método que permite a inclusão directa de variáveis de caracterização do uso do solo e do tipo de solo (fundamentais para a quantificação das variáveis relativas ao número característico do escoamento NC, e de reserva máxima de água no solo para evapotranspiração AGUT), e que tira maior partido da informação recolhida no âmbito do Projecto Comunitário CORINE Land-Cover. O somatório das recargas avaliado apenas para a área aflorante dos sistemas hidrogeológicos de Portugal Continental por OLIVEIRA e LOBO-FERREIRA (1994) foi da ordem dos 6,5 km^3.

OLIVEIRA e LOBO-FERREIRA (1994) desenvolveram uma nova versão do modelo BALSEQ, que inclui a consideração do estado de humidade antecedente do solo. A actualização corresponde à introdução do conceito de NC variável (na versão original considerou-se para NC

o seu valor médio, sendo portanto uma constante).

Tendo em vista o início do estudo de calibração do modelo BALSEQ, seleccionaram-se dois poços de observação, localizados na península de Setúbal, e compararam-se os níveis hidrostáticos medidos entre 1979 e 1991 com os valores de recarga calculados pelo modelo BALSEQ. Contudo, os autores verificaram que **não há uma relação linear entre um episódio de recarga e a subida do nível**, não podendo, nos casos apresentados, calibrar o modelo BALSEQ utilizando apenas a evolução dos níveis nos poços seleccionados. **A forma de calibrar a recarga estimada pelo modelo BALSEQ**, a partir da análise da variação de níveis, poderá ser eventualmente conseguida através da construção de um modelo numérico de escoamento para uma área suficientemente extensa, com um controlo exaustivo da piezometria, da precipitação e da evapotranspiração, e um bom conhecimento das propriedades hidráulicas e da geometria do meio.

Os estudos desenvolvidos no LNEC, no âmbito dos Contratos com a Comissão Europeia, baseados na aplicação do novo método desenvolvido por VERMEULEN *et al.* (1993 e 1994), **para avaliação da recarga de aquíferos permitiram a obtenção do primeiro mapeamento integral da recarga potencial do território de Portugal Continental**, apresentada na Fig. 2.1 e publicada à escala 1:1 500 000 em OLIVEIRA e LOBO-FERREIRA (1994).

2.2.3 Determinação da Recarga de Águas Subterrâneas a partir da Análise de Hidrogramas de Escoamento

2.2.3.1 Introdução

O estudo do escoamento total que passa numa secção de um rio utilizando o hidrograma permite distinguir três tipos diferentes de escoamento: o escoamento superficial (ou directo), o escoamento hipodérmico (ou intermédio) e o escoamento profundo (ou de base).

O escoamento directo é o escoamento que se processa acima da superfície do terreno, continuando até à rede hidrográfica e por esta até à secção do rio a que pertence o hidrograma.

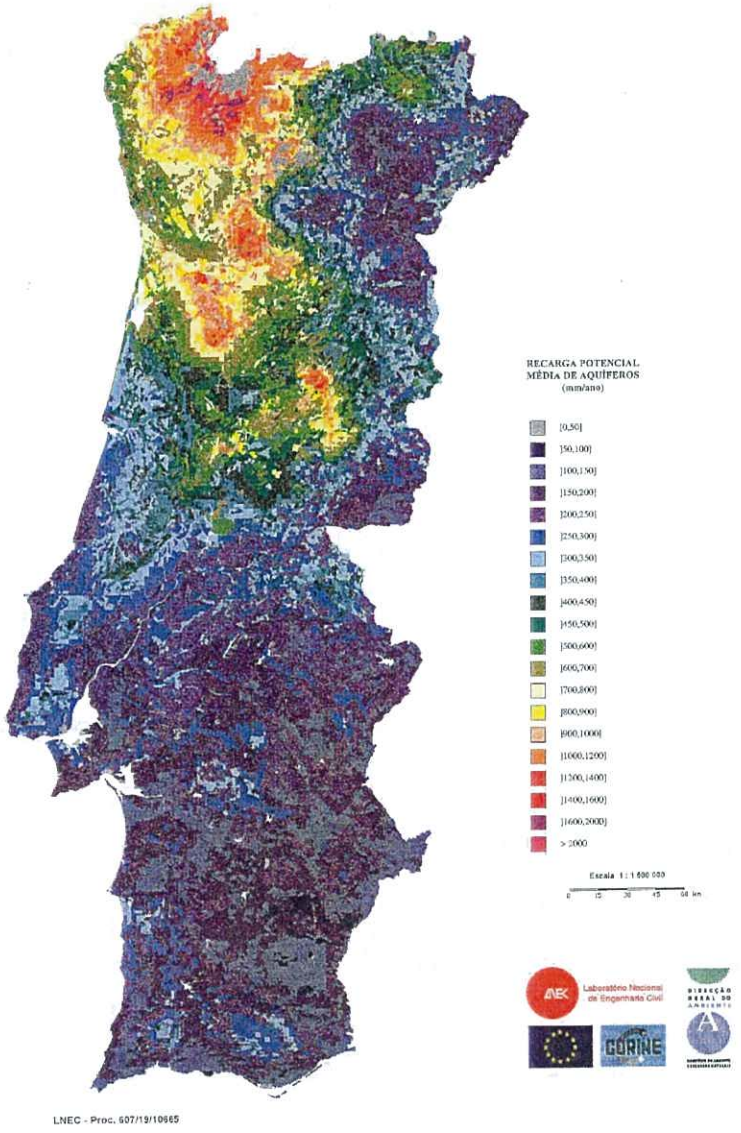


Fig. 2.1 - Primeiro mapeamento integral da recarga potencial do território de Portugal Continental desenvolvido no LNEC

(Figura extraída de OLIVEIRA e LOBO-FERREIRA (1994)

O escoamento intermédio corresponde à fracção da precipitação que se infiltra, mas que escoa a pouca profundidade no terreno e que chega aos cursos de água com um pequeno atraso em relação ao escoamento superficial.

Finalmente, o escoamento de base corresponde à parte da infiltração que foi sujeita a processos de infiltração profunda e que depois, por circuito subterrâneo, acaba por alimentar o curso de água superficial, sendo em muitos casos responsável pela manutenção do caudal dos rios nos meses de verão.

Não havendo extracções de água subterrânea, a quantificação do escoamento de base durante um longo período dá directamente os valores de recarga de aquíferos existentes na bacia hidrográfica. Se houver escoamento de base e houver extracções de água subterrânea, então a recarga de aquíferos é dada pela soma das extracções com o escoamento de base.

A forma de determinar o escoamento de base vem descrita em LENCASTRE e FRANCO (1984), assumindo que tanto o escoamento de base como o escoamento intermédio podem ser expressos pela lei de Maillet:

$$Q_t = Q_O \, e^{-\alpha t} \tag{8}$$

em que: Q_t é o caudal na secção no instante t; Q_O é o caudal no início do período considerado, e α é um coeficiente característico das formações locais. No caso do escoamento de base, esta equação traduz a curva de esgotamento das reservas subterrâneas.

Sabendo o tempo desde o início do escoamento de base provocado pela precipitação (que pode ser considerado coincidente com a ponta do hidrograma) e o caudal escoado no tempo t, é possível determinar o escoamento de base correspondente a um episódio de precipitação.

No âmbito do Protocolo de Cooperação estabelecido entre o INAG e o LNEC, sobre o tema "Cartografia Automática da Vulnerabilidade de Aquíferos com base na Aplicação do Método DRASTIC" apresentaram-se diversos métodos que permitem a avaliação da recarga de águas subterrâneas (*cf.* OLIVEIRA *et al.* (1997b) e OLIVEIRA, 1997). Um desses métodos consiste na separação do escoamento total de uma bacia hidrográfica em escoamento superficial e em escoamento de base, sendo este último uma medida do volume hídrico que recarregou as águas subterrâneas.

Tendo em vista a definição de recarga considere-se a equação de balanço hídrico para um determinado espaço e tempo:

$$P + E_{si} + E_{bi} - ETR_l - Ev_s - E_{so} - E_{bo} - dS_s - dS_l - dS_b + V = 0 \tag{9}$$

onde P é a precipitação, E é o escoamento, ETR é a evapotranspiração real, Ev é a evaporação, dS, é a variação de água armazenada (final - inicial), V é a injecção (+) ou a extracção (-) de água no sistema. Os índices referem-se: $_s$ a água superficial, $_b$ a água subterrânea, $_l$ a água do solo, $_i$ a entrada e $_o$ a saída.

A infiltração superficial (I) define-se como toda a água que em sentido descendente passa para baixo do topo do solo, ou seja:

$$I = P + E_{si} - Ev_s - E_{so} - dS_s \tag{10a}$$

$$I = ETR_l + E_{bo} + dS_l + dS_b - E_{bi} - V \tag{10b}$$

A recarga natural (R) pode-se definir como a água de infiltração superficial que não fica nem

armazenada no solo nem é evapotranspirada:

$$R = I - ETR_l - dS_l \tag{11a}$$

$$R = P + E_{si} - Ev_s - E_{so} - dS_s - ETR_l - dS_l \tag{11b}$$

$$R = E_{bo} + dS_b - E_{bi} - V \tag{11c}$$

Alguns destes termos podem ser desprezados se forem nulos ou muito pequenos. Outros termos podem ser separados para considerar vários aquíferos, diversos tipos de armazenamento, etc.

No caso de se considerar uma bacia hidrográfica, o termo E_{si} é nulo e o termo E_{bi} é muito pequeno ou mesmo nulo. Se não houver áreas de armazenamento de água à superfície (lagos, albufeiras, etc.), o termo dS_s é nulo e o termo Ev_s é muito pequeno. A Fig. 2.2 mostra as componentes do balanço hídrico para esta situação e considerando dS_l nulo; o termo E refere-se ao escoamento total ($=E_s + E_b$). Utilizando as simplificações referidas, as expressões (11) transformam-se em:

$$R = I - ETR_l - dS_l \tag{12a}$$

$$R = P - E_{so} - ETR_l - dS_l \tag{12b}$$

$$R = E_{bo} + dS_b - V \tag{12c}$$

Para as condições subjacentes à formulação das expressões (12), se se considerar a expressão (12c) verifica-se que a recarga pode ser determinada conhecendo os valores de E_{bo}, dS_b e V. No caso de não haver extracções nem injecções de água no subsistema subterrâneo, o termo V é nulo. Igualmente se o intervalo de tempo considerado for muito longo (por exemplo superior a um ano, ou nalgumas condições superiores a um mês), o termo dS_b é muitíssimo inferior ao termo E_{bo}. Nestes casos a recarga virá dada por:

$$R = E_{bo} \tag{13}$$

Pela expressão (13) verifica-se que uma das formas de estimar a recarga de aquíferos é através da determinação do escoamento de base de uma bacia hidrográfica. Este pode ser determinado pela análise dos hidrogramas de escoamento.

2.2.3.2 Hidrograma de Escoamento

Se se tiver um hidrograma de escoamento de uma bacia hidrográfica, o escoamento total

observado é o resultado do somatório do escoamento directo e do escoamento de base. O escoamento directo é formado (1) por água que precipita na bacia hidrográfica e que escoa à superfície e (2) por água que precipita directamente sobre a rede hidrográfica. O escoamento de base é composto pela água que após ter precipitado se infiltra no solo, eventualmente ultrapassando a camada inferior do solo e que posteriormente aflora à superfície e acaba por passar também na secção da bacia hidrográfica.

A Fig. 2.3 representa um hidrograma teórico referente ao período durante e após uma chuvada. Nesse hidrograma definem-se as seguintes partes distintas (LENCASTRE e FRANCO, 1984): (1) curva de crescimento; (2) ponta do hidrograma; (3) curva de decrescimento; (4) curva de esgotamento. A curva de crescimento corresponde ao aumento do escoamento que ocorre por efeito da chuvada. A ponta do hidrograma ocorre no valor máximo de escoamento.

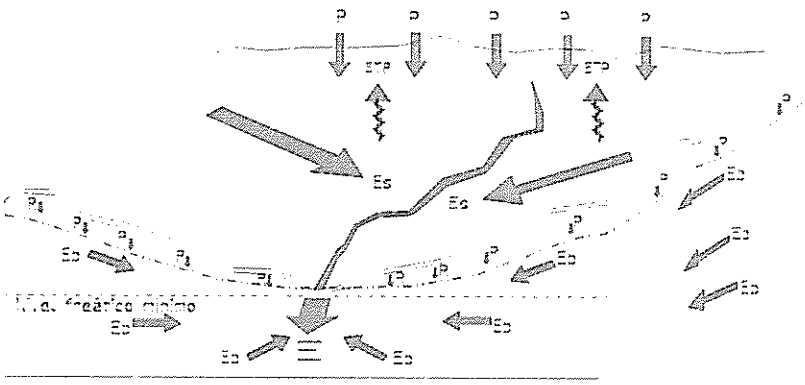


Fig. 2.2 - Representação esquemática do ciclo da água num troço de uma bacia hidrográfica com indicação das componentes utilizadas para a elaboração das equações de balanço hídrico

(Figura extraída de OLIVEIRA, 1997)

A curva de decrescimento corresponde à diminuição progressiva do escoamento directo até que este se anula. O tempo de crescimento mais o tempo de decrescimento definem o tempo base do hidrograma e corresponde ao período durante o qual se verifica o escoamento directo. A curva de esgotamento ou de recessão corresponde ao decréscimo do escoamento que provém somente do escoamento de base.

As duas grandes componentes do escoamento total (directo e de base) podem ser individualizadas no hidrograma. Teoricamente, pode ser difícil localizar no hidrograma a posição do ponto onde se dá o fim do escoamento directo. LINSLEY *et al.* (1975) apresentam a seguinte expressão para calcular o tempo desde o pico do hidrograma até um ponto seleccionado arbitrariamente na curva de esgotamento que pretende traduzir o fim do escoamento directo:

$$N = 19{,}84 \times A^{0.2} \qquad (14)$$

onde A é a área em km^2 e N é o número de horas.

Apresentam-se dois métodos práticos para fazer a decomposição do hidrograma:

- Translação da curva de esgotamento (*recession curve displacement*), apresentado em RUTLEDGE e DANIEL (1994);
- Decomposição do escoamento total (*streamflow partitioning*), apresentado em SHIRMOHAMMADI *et al.* (1984).

2.2.3.3 Método da Translação da Curva de Esgotamento

O método da translação da curva de esgotamento baseia-se num conjunto de procedimentos que permite calcular a recarga associada a cada pico de escoamento total. De acordo com RUTLEDGE e DANIEL (1994) este método é utilizável na análise de sistemas de fluxo caracterizados por recarga difusa e onde se pode considerar o rio como o local de descarga do sistema subterrâneo. A recarga é considerada aproximadamente coincidente com os picos de escoamento. O método consiste no deslocamento, para cima, da curva de esgotamento como resultado da recarga. Só se utilizam as partes do hidrograma para medir o deslocamento que correspondem unicamente a descarga subterrânea. O ponto a partir do qual tal acontece pode ser determinado a partir da expressão (14).

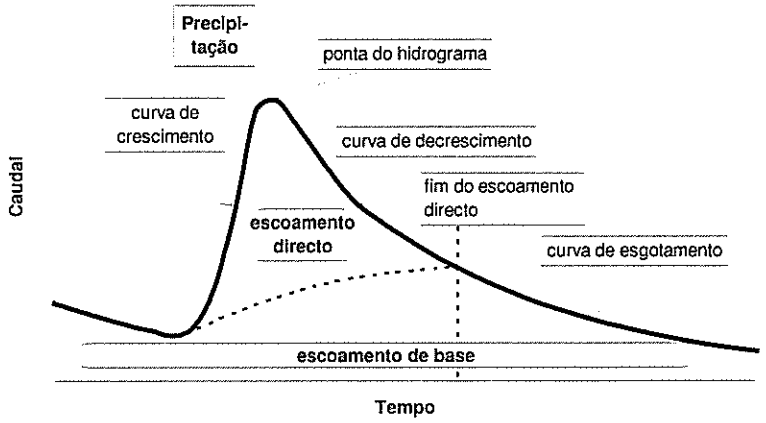


Fig. 2.3 - Características do hidrograma

(Figura extraída de OLIVEIRA, 1997)

Definindo descarga de água subterrânea potencial (E_{bp}) como o volume total de água que drenaria o sistema durante um tempo infinito sem novo episódio de recarga, esta poderia ser dada pela expressão:

$$E_{bp} = Q / \alpha \qquad (15)$$

que não é mais que a integração da equação de Maillet para um valor inicial de caudal (Q),

sendo α o coeficiente de esgotamento.

RORABOUGH (1964, *in* RUTLEDGE e DANIEL, 1994), expressou a descarga de água subterrânea para um rio como uma função complexa do tempo após a recarga, tendo contudo constatado que essa função pode ser aproximada após um "**tempo crítico**" por uma relação simples que diz que, no "tempo crítico" após o pico do caudal total, a descarga de água subterrânea potencial é aproximadamente metade do volume total de água que recarregou o sistema, ou seja:

$$R = 2\,[\,Q_2 / \alpha - Q_1 / \alpha\,] \qquad (16)$$

representando Q_2/α o volume de água subterrânea descarregado desde o "tempo crítico" após o pico do escoamento, determinado a partir da extrapolação da curva de esgotamento após o pico do escoamento, e Q_1/α o volume de água subterrânea descarregado desde o "tempo crítico" após o pico do escoamento, determinado a partir da extrapolação da curva de esgotamento anterior ao pico do escoamento em análise (*cf.* Fig. 2.4).

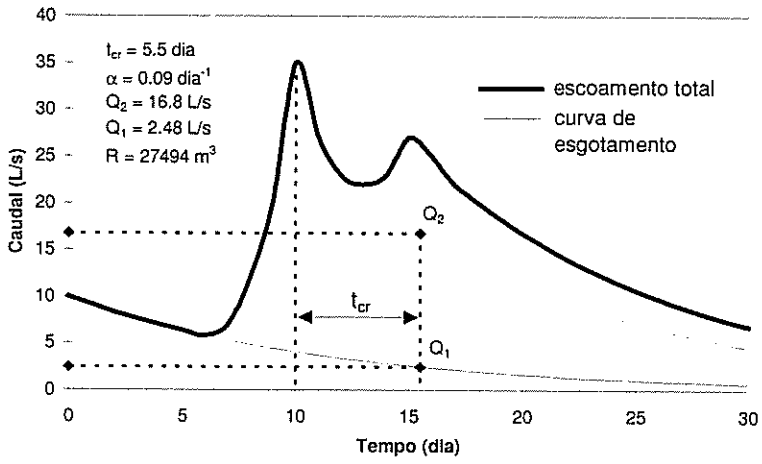


Fig. 2.4 - Cálculo da recarga pelo método da translação da curva de esgotamento

(Figura extraída de OLIVEIRA, 1997)

O "tempo crítico" (t_{cr}) referido por RUTLEDGE e DANIEL (1994) é dado pela expressão:

$$t_{cr} = 0{,}4937 / \alpha \qquad (17)$$

O funcionamento do método da translação da curva de esgotamento é facilmente compreensível se se atentar na Fig. 2.4, que representa um hidrograma de escoamento total com um episódio de precipitação que provocou recarga. O procedimento é extraído de RUTLEDGE e DANIEL (1994). Calcula-se o coeficiente de esgotamento a partir do hidrograma e calcula-se o "tempo crítico" utilizando a expressão (17). Os valores determinados por este procedimento manter-se-ão fixos para toda a série de registos. Depois, para cada pico, utiliza-se o "tempo crítico" para

determinar o tempo no hidrograma a partir do qual se extrapolam as curvas de esgotamento. A partir da extrapolação da curva de esgotamento anterior ao pico e para a curva de esgotamento correspondente ao pico em análise, calculam-se os valores de Q_1 e Q_2 que se substituem na expressão (16) para calcular a recarga produzida pelo episódio de precipitação em análise.

2.2.3.4 Método da Separação do Escoamento

O método de separação do escoamento baseia-se no cálculo do escoamento directo permitindo, por diferença para o escoamento total da bacia, calcular o escoamento de base. À partida definem-se dois factores: (1) a precipitação mínima necessária para provocar escoamento directo e (2) o tempo de duração do escoamento directo após a(s) chuvada(s).

Apesar de se assumir um valor constante para a quantidade mínima de precipitação necessária para provocar escoamento directo, esta depende da humidade do solo e da retenção superficial (charcas, poças de água) sendo, em princípio, menor no Inverno, quando a evapotranspiração é menor e chove em quantidade, do que no Verão, quando a evapotranspiração é elevada e a precipitação é reduzida.

O funcionamento deste método é facilmente explicável a partir do exemplo fictício que se reproduz na Fig. 2.5, idêntica à apresentada por SHIRMOHAMMADI *et al.* (1984). O procedimento é igualmente extraído do texto dos mesmos autores. Considera-se que o tempo de duração do escoamento directo é o da chuvada mais dois dias e que o valor mínimo de precipitação para haver escoamento é de 5 mm. No dia 4, choveram 4 mm. Dado que este valor é inferior ao valor mínimo, não se estima escoamento directo. No dia 6, choveram 12 mm, pelo que se assume que o escoamento directo ocorreu naquele dia e nos dois dias seguintes. O escoamento directo é dado pela área compreendida entre a linha que une o escoamento total no dia 5 com o escoamento total no dia 9 e o escoamento total nesses dias (área a sombreado). Nos dias 11, 12 e 13, a precipitação foi superior ao valor mínimo necessário para provocar escoamento directo, pelo que se assume que há escoamento directo nos dias 11 a 15. Para determinar o escoamento directo une-se o escoamento total dos dias 10 a 16. A área acima da linha representa o escoamento directo e a área abaixo desta linha representa o escoamento de base. Nos dias 21 e 23, a precipitação foi superior à precipitação mínima. Uma vez que se assume que o escoamento directo ocorre nos dois dias a seguir ao dia de chuva, unem-se os escoamentos totais dos dias 20 e 26.

2.2.3.5 Programa DECHIDR.BAS

O método programado conjuga o coeficiente de esgotamento da curva de esgotamento com o método da separação do escoamento directo. Para o caso de um episódio de precipitação cujo escoamento superficial não se sobreponha ao escoamento superficial originado pelo episódio de precipitação anterior, o método funciona como o da separação do escoamento directo. Se houver sobreposição de episódios de precipitação, utiliza-se o coeficiente de esgotamento para separar os escoamentos totais provocados por cada chuvada.

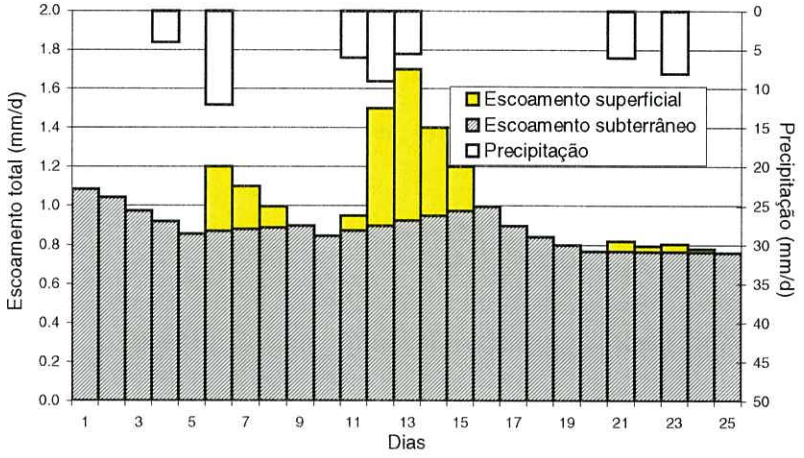


Fig. 2.5 - Cálculo da recarga pelo método da decomposição do escoamento total

(Figura extraída de OLIVEIRA, 1997)

O método foi programado por OLIVEIRA (1997) em QuickBASIC, tendo o autor denominado o programa de DECHIDR.BAS. Em OLIVEIRA (1997) descreve-se o funcionamento do programa, que é composto por seis partes, exemplificando algumas situações com figuras.

2.2.4 Balanço de Cloretos

O método para o cálculo da infiltração a partir do balanço de cloretos vem descrito em CUSTODIO e LLAMAS (1976). Se choverem P mm/ano, dos quais E_S mm/ano escorrem superficialmente e ETR mm/ano são evapotranspirados, a infiltração I mm/ano será:

$$I = P - EVR - E_S \qquad (18)$$

Considerando C_p o teor médio de cloretos da água da chuva (ppm), C_i o teor de cloretos na água de infiltração profunda, a_s o teor de cloretos retirados do solo ou transportados artificialmente em g/m^2/ano, a_v a retenção na vegetação e a'_v a devolução de sais ao solo pela

vegetação ao morrer, também em g/m^2/ano, o balanço do ião cloreto será:

$$I / 1000 \times C_i = (P - E_S) / 1000 \times C_p + a_s - a_v + a'_v \qquad (19)$$

pressupondo-se que o escoamento superficial não produz eliminação de sais. Em zonas áridas este balanço pode ser algo pessimista já que a concentração de sais no reduzido escoamento pode ser várias vezes a da água da chuva (CUSTODIO e LLAMAS, 1976).

Nessas zonas não se deve desprezar a existência de escoamento subsuperficial ou hipodérmico e a sua capacidade notável para lavar sais depositados no horizonte A do terreno.

Supondo, como é frequente, que $a_S = 0$ e que $a_v = a'_v$, o que ocorre quando um terreno não é cultivado intensivamente e existe um equilíbrio entre a matéria orgânica viva e em decomposição, será:

$$I / P = (1 - E_S / P) \times C_p / C_i \qquad (20)$$

e se o escoamento superficial for muito pequeno (terrenos muito planos e com boa permeabilidade superficial) será:

$$I / P \approx C_p / C_i \qquad (21)$$

Estas relações simples permitem calcular o coeficiente de infiltração e a evapotranspiração. Admite-se que o terreno e a vegetação actuam como agente regulador para amortecer as variações estacionárias e, assim, anuais. O valor de C_i deve medir-se na parte superior do aquífero livre.

O balanço não pode realizar-se com garantia utilizando outros iões por serem facilmente alterados durante a infiltração.

De acordo com CUSTODIO e LLAMAS (1976), os resultados do balanço do ião cloreto são bons em zonas áridas e em zonas planas, mas não tão bons em zonas húmidas ou com elevado escoamento superficial.

OLIVEIRA e LOBO-FERREIRA (1994) referem diversos estudos desenvolvidos em território nacional onde se aplicou a técnica do balanço de cloretos para avaliação da recarga de aquíferos em Portugal. Recentemente, CANDEIAS e LOURENÇO DA SILVA (1998) para o estudo da formação carbonatada de Viana do Alentejo – Alvito, com uma área aproximada de 17,5 km^2, aplicaram o método de balanço de cloretos, tendo chegado a uma recarga média anual de 1,8x106 m^3 (*i.e.* a um valor de recarga (1,8/17,5 m) = 103 mm).

2.2.5 Estimativa da Recarga por Análise da Concentração de Trítio

Com base em estudos desenvolvidos pelo CEDEX (1998) para os sistemas aquíferos da zona ribeirinha espanhola do estuário do rio Guadiana, apresenta-se nesta secção uma metodologia para estimativa da recarga por análise da concentração de trítio.

O trítio proporciona (como ordem de grandeza) uma informação quantitativa da recarga de aquíferos. O método baseia-se na comparação dos balanços de trítio existentes nas precipitações locais e nas águas do aquífero. Se se designar por R a recarga anual média expressa em litros por metro quadrado e por $C_0\ (t')$ a função de entrada de trítio no aquífero (*e.g.* Quadro 2.1 referente a Espanha), dada pelos valores da última coluna do Quadro 2.1 (valores não corrigidos), a actividade total de trítio (A) presente no aquífero por unidade de superfície é dada pela seguinte expressão:

$$A = \int_{1952}^{t} R(t')C_0(t')e^{-\lambda(t-t')}dt \tag{22}$$

onde λ é a constante de desintegração do trítio, dada pela expressão ln 2/12,43=0,05576 anos^{-1}, sendo t o ano em curso.

Se em lugar de R se considerar a recarga média R_m, referida ao período entre o tempo t e 1952, a equação anterior passa a ser a seguinte:

$$A = R_m \int_{1952}^{t} \frac{R(t')}{R_m} C_0(t')e^{-\lambda(t-t')}dt \tag{23}$$

De uma forma aproximada, a relação $R(t')/R_m$ pode supor-se igual à relação $P(t')/P_m$, sendo P a precipitação anual média, ou então à relação $H(t')/H_m$, sendo H o nível freático do aquífero na zona em estudo.

Por outro lado, a actividade real do trítio presente no aquífero, por unidade de superfície, pode determinar-se por integração dos perfis deste radioisótopo no terreno, de acordo com a expressão seguinte:

$$A = \int_{0}^{h} p(h)C(h)dh \tag{24}$$

onde p é a porosidade, C a concentração de trítio e h a profundidade.

Para que o método seja preciso, as funções $p(h)$ e $C(h)$ devem incluir, tanto a zona saturada, como a zona não-saturada. Uma vez que estes parâmetros costumam variar fortemente de um

lugar para o outro, a sua determinação exigiria a perfuração de um número elevado de furos para este fim. A concentração de trítio na água subterrânea de um aquífero deveria, assim, ser feita mediante análises recolhidas tanto na zona não-saturada como a várias profundidades na zona saturada. Na prática esta exigência resulta impossível. A única possibilidade, no caso da zona saturada, é a determinação da actividade total do trítio utilizando-se a seguinte expressão:

$$A = p.C_m.\Delta h \tag{25}$$

sendo p a porosidade média determinada pelos métodos convencionais ou então estimada, C_m a concentração média do trítio medida na água extraída por bombagem do furo, e Δh é a possança, *i.e.* a espessura da zona saturada, ou o comprimento da coluna de água no furo.

De acordo com o indicado anteriormente, a recarga do aquífero será dada pela seguinte expressão:

$$R_m = \frac{p.C.\Delta h}{\int_{1952}^{t} \frac{P(t')}{P_m} C_0(t') e^{-\lambda(t-t')} dt} = \frac{UTxm}{UTxano} = \frac{m}{ano} \tag{26}$$

Se a recarga for considerada igual em todos os anos compreendidos entre a data da amostragem e o ano de 1952, o denominador da expressão anterior equivale à soma das concentrações de trítio corrigidas da desintegração radioactiva indicadas na última coluna do Quadro 2.2. O valor desta soma ascende a 596 UT·ano. Contudo, há que ter em consideração que as águas das precipitações dos últimos anos, e por conseguinte o trítio nelas contido, não alcançaram ainda a zona saturada. Assim sendo, estas águas não contribuem para a concentração medida na água da captação. Suponhamos, como estimativa, que nas áreas de recarga livre esta ocorre com a água dos últimos cinco anos. Deste modo, o valor anterior de 596 UT·ano reduz-se a 579 Utm. Foi este o valor utilizado por CEDEX (1998) para obter as estimativas da recarga.

A estimativa da recarga dada pela Equação (26) só deve ser feita para os furos profundos do aquífero costeiro, nos quais o comprimento da coluna de água é suficientemente grande para se poder supor que se recolheu a mostra de toda a espessura do aquífero onde se encontra o trítio dos últimos 45 anos. Os poços escavados à mão só penetram alguns metros abaixo do nível freático, pelo que é certo que por baixo do nível escavado a água contenha elevadas concentrações de trítio. Lamentavelmente, como os autores de CEDEX (1998) referem, não se dispunha de informação sobre o nível piezométrico das captações amostradas. Assim, o valor de Δh foi estimado, pelos autores, subtraindo à profundidade conhecida dos furos o nível freático

considerado igual a 10 metros. Para a porosidade, os autores admitiram um valor igual a 0,25.

Com os valores anteriores de Δh e da porosidade admitida, com as concentrações de trítio do Quadro 2.1 e com o valor de 579 UT·ano, correspondente à expressão integral do denominador da Equação (26), obtiveram-se os valores da recarga apresentados no Quadro 2.3. Logicamente, estes valores devem ser corrigidos utilizando os valores verdadeiros do nível freático. Os valores obtidos para a recarga indicam valores médios referidos ao período compreendido entre 1953 e 1992, porque se supôs que a infiltração de água das precipitações posteriores ao ano de 1992 se encontram ainda na zona não-saturada do solo. Observa-se que para os furos 841-4001, 841-7038, 841-7057, 841-7068 e 841-7102, se obtiveram valores de recarga bastante semelhantes entre si, compreendidos entre 82 e 101 mm/ano, com um valor médio de 92 mm/ano, em princípio, valor que se pensa ser justificável para a recarga do aquífero livre. Para o furo 481-7081, a recarga obtida foi menor (35 mm/ano). Para os furos 481-8012 e 481-8017, os valores da recarga são muito mais baixos, o que indica que estes furos devem encontrar-se em áreas do aquífero confinado, onde a permeabilidade dos estratos superficiais é muito baixa. Valores igualmente baixos da recarga foram também obtidos para os furos 481-8060 e La Gravera, onde a concentração de trítio também é muito baixa (os autores desconheciam a profundidade desses furos).

Quadro 2.1 - Resultados das análises de trítio de CEDEX (1998)

Amostra	Conc. (UT)	Amostra	Conc. (UT)
Poço 2	4,7±0,33	Furo 841-7006	4,8±0,33
Poço 4	4,2±0,33	Furo 841-7038	2,6±0,31
Poço 8	3,7±0,31	Furo 841-7057	2,6±0,29
Poço 9	3,3±0,31	Furo 841-7068	2,8±0,30
Poço 12	3,5±0,33	Furo 841-7081	1,3±0,28
Poço 14	4,2±0,34	Furo 841-7102	2,6±0,31
Poço 17	5,5±0,33	Furo 841-8012	0,03±0,26
Fonte 1	4,9±0,33	Furo 841-8017	0,65±0,26
Fonte 2	2,8±0,30	Furo 841-8060	0,92±0,25
Rio Guadiana	4,4±0,33	Furo La Gravera	0,52±0,26
Furo 841-4001	5,8±0,33		

Quadro 2.2 - Modelo de concentração de trítio válido para precipitações médias da zona de estudo de CEDEX (1998)

ANO	MODELO PARA O HEMISFÉRIO NORTE (‰) (1)	CONCENTRAÇÃO DA PRECIP. MADRID, (UT)	CONCENTRAÇÃO DA PRECIP. GIBRALTAR (UT) (2)	(2)/(1)	MODELO PARA A PRECIP. DA ZONA DE ESTUDO (UT)
1953	8.4				7.6(0.66)
1954	91.5				83.1(7.6)
1955	13.2				12.0 (1.1)
1956	58.5				53.1(5.4)
1957	37.6				34.1(3. 7)
1958	186.8				169.7 (19.3)
1959	146.6				133.1 (16.0)
1960	50.7				46.0(5.8)
1961	53.6				487(6.5)
1962	276.6		174	0.629	251.1 (35.7)
1963	1000.0		659	0.659	908.0 (135.4)
1964	538.1		412	0.766	488.6 (77.6)
1965	273.0		183	0.670	247.9 (41.6)
1966	183.2		116	0.633	166.3 (29.5)
1967	106.3		114	1.073	96.5(18.1)
1968	81.1		94	1.160	73.6(14.6)
1969	76.8		83	1.081	69.7(14.6)
1970	65.4	104.6	62	0.947	59.4(13.2)
1971	78.5	153.2	73	0.929	71.3(16.7)
1972	41.8	51.4	32	0.766	37.9(9.4)
1973	37.0	64.8	30.9	0.834	33.6(8.8)
1974	41.6	67.1	34.8	0.836	37.8(10.5)
1975	35.4	38.7	25.9	0.731	32.2(9.4)
1976	27.8	31.2	25.0	0.900	25.2(7.8)
1977	24.8	39.5	23.9	0.964	22.5(7.4)
1978	27.5	44.7	17.5	0.637	25.0(8.7)
1979	16.5	21.9	22.0	1.332*	15.0(5.5)
1980	14.5	33.5	16.0	1.101	13.2(5.1)
1981	15.7	41.5	16.2	1.033	14.2(5.8)
1982	10.9	14.5	13.5	1.237	9.9(4.3)
1983	9.5	11.6	11.6	1.227	8.6(3.9)
1984	7.5	18.6	15.8	2.095*	6.8(3.3)
1985	7.3	11.5	8.4	1.154	6.6(3.4)
1986	7.2	11.0			6.5(3.5)
1987	6.7	10.4			6.0(3.5)
1988	6.3	12.3			5.7(3.5)
1989	7.4	10.8			6.7(4.3)
1990	5.3				4.8(3.2)
1991	5.4	8.5			4.9(3.5)
1992	5+	8.3			4.5(3.4)
1993	4.5+	9.1			4.1(3.3)
1994	4.5+	7.1			4.1(3.5)
1995	4.5+	6.9			4.1(3.7)
1996	4.5+	6.9			4.1(3.9)

NB: Valor médio dos factores **(2)/(1)** igual a 0,908 (não foram incluídos os valores marcados com asterisco). Os valores marcados com o sinal + são valores estimados

Quadro 2.3 - Valores da recarga estimados com base no trítio para captações profundas do aquífero costeiro (espanhol) da área do estuário do rio Guadiana, estudado por CEDEX (1998)

FURO	PROFUNDIDADE (m)	CONCENTRAÇÃO DE TRÍTIO (UT)	RECARGA (mm/ano)
841-4001	43	5,8	82
84 1-7006	13	4,8	(*)
841-7038	96	2,6	97
841-7057	90	2,6	90
841-7068	84	2,8	90
841-7081	72	1,3	35
841-7102	100	2,61	101
841-8012	87	0, 03	1
841-8017	60	0,65	14
841-8060		0,92	
La Gravera		0,52	

(*) Furo pouco profundo para o cálculo da recarga.

2.2.6 Método de Kessler

O método de Kessler foi desenvolvido por este autor para calcular o balanço hídrico de zonas cársicas na Hungria. Este método calcula a taxa de infiltração, a partir da qual se pode depois calcular a recarga e proceder à determinação dos balanços hídricos duma dada região.

Segundo ALMEIDA (1985), o método de Kessler só deverá ser usado após a comprovação da sua eficácia à zona que se deseja estudar. Este método (CUSTODIO e LLAMAS (1976) e ALMEIDA, 1985) considera a relação entre a precipitação dos meses eficazes em produzir recarga (P_e) e a precipitação total anual (P). Para a Hungria os meses eficazes em produzir recarga são os primeiros quatro meses do ano. Esta relação deve ser ajustada por um factor K que depende de um parâmetro $x = (P_a - P_{amed}) / P_{amed}$, sendo P_a a precipitação nos meses que precedem aqueles em que se produz a recarga (no caso húngaro são os últimos quatro meses do ano anterior ao ano em estudo) e P_{amed} a precipitação total ocorrida nos mesmos meses, mas para toda a série de precipitação, a dividir pelo número de anos da série. No Quadro 2.4 apresenta-se a relação entre x e K para a Hungria.

Obtém-se o valor u adicionando K (cujo sinal positivo ou negativo é idêntico ao de x) à razão P_e/P. Com este valor de u estabelece-se uma relação simples com a recarga (infiltração eficaz) medida como uma fracção da precipitação anual (I_r).

Quadro 2.4 - Método de Kessler: valores da relação entre x e K para a Hungria

x (%)	K (%)
± 0 - 5	± 0
± 6 - 15	± 1
± 16 - 25	± 2
± 26 - 35	± 3
± 36 - 45	± 4
± 46 - 55	± 5
± 56 - 60	± 7
± 61 - 65	± 10
± 66 - 70	± 13
> ± 70	± 15

No Quadro 2.5 apresenta-se, para o caso húngaro, a relação entre u e I_r (*cf.* CUSTODIO e LLAMAS, 1976).

Quadro 2.5 - Método de Kessler: valores da relação relação entre u e I_r para a Hungria

u	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60
I_r	0,10	0,18	0,26	0,33	0,38	0,44	0,48	0,53	0,58	0,63	0,67	0,70

Verificou-se que a taxa de infiltração parece aumentar nas regiões de maior altitude, isto é, onde a vegetação é menor e parece ser independente do declive do terreno. O ritmo de gotejamento nas depressões e cavidades subterrâneas relaciona-se com as chuvas ocorrentes nos dias anteriores (CUSTÓDIO e LLAMAS, 1976), sendo a magnitude desta repercussão dependente da época do ano e do estado da cobertura vegetal da superfície.

Kessler considera que para uma mesma zona e igual precipitação, a recarga pode variar entre 7 e 70% desta, tendo grande importância a distribuição temporal das chuvas e o consumo de água pela vegetação (REIS, 1993).

NOVO (1994) apresenta uma caracterização de outros métodos também utilizados para quantificação da recarga de aquíferos cársicos.

2.2.7 Análise da Variação do Nível Freático e/ou do Nível Piezométrico

Uma outra forma de determinar a recarga é através da análise da variação do nível freático, no caso de aquífero livre, ou da variação do nível piezométrico no caso de aquífero confinado.

Se se considerar um volume vertical de aquífero livre, a recarga R num intervalo de tempo t é dada pela seguinte expressão

$$R = Q_s\, t \; - \; Q_e\, t + \int n_e\, \Delta H\, da \tag{27}$$

onde Q_e é o caudal que entra na secção vertical de aquífero (inclui o caudal proveniente de fluxo subterrâneo e o caudal induzido por todas as formas de recarga à excepção da provocada pela infiltração da água da chuva), Q_s é o caudal que sai da secção vertical de aquífero (inclui o fluxo subterrâneo e o das extracções de água), n_e é a porosidade eficaz do aquífero, ΔH é a variação do nível freático e da é o elemento de área para o qual se verifica a variação do nível freático.

A recarga de um aquífero confinado é traduzida pela mesma expressão mas considerando o coeficiente de armazenamento do aquífero confinado, S, em vez de n_e e considerando a variação do nível piezométrico, Δh, em vez de ΔH.

Supondo que a superfície se desloca paralelamente a si própria, que o meio é homogéneo, e que a diferença entre o caudal de entrada e o de saída da secção vertical é zero, então ΔH e n_e (Δh e S) são constantes para todos os elementos de área, $Q_s = Q_e$ e a expressão anterior simplifica-se para

$$R = \Delta H \times n_e \tag{28}$$

no caso de um aquífero livre, e para

$$R = \Delta h \times S \tag{29}$$

no caso de um aquífero confinado. Estas situações não são, no entanto, vulgares na natureza.

2.2.8 Aplicação da Lei de Darcy

O caudal que passa numa secção de um aquífero pode ser avaliado pela lei de Darcy

$$Q = A \times K \times i \tag{30}$$

onde Q é o caudal que passa na área A perpendicular ao fluxo, por acção do gradiente hidráulico, i, tendo o meio condutividade hidráulica K. O gradiente hidráulico é dado pela relação entre a diferença de potencial hidráulico na direcção paralela ao fluxo e a distância para a qual se verifica essa diferença de potencial.

Se se considerar uma secção de uma bacia hidrogeológica em situação de regime permanente, secção definida por uma linha equipotencial, e se não houver extracções ou recargas laterais, a recarga do aquífero num determinado período de tempo é igual ao valor do caudal que passa na secção no mesmo período de tempo, por exemplo um ano hidrológico. O caudal obtém-se integrando a expressão anterior para o período em questão (A e i podem variar em n intervalos de tempo, assumindo-se contudo constantes nesses intervalos de tempo):

$$Q = \sum A_j \, x \, K \, x \, i_j \qquad (j \text{ varia entre 1 e } n) \tag{31}$$

A recarga por área obtém-se dividindo o caudal escoado pela área da bacia a montante da equipotencial.

LOBO-FERREIRA e DELGADO RODRIGUES (1988) apresentaram no livro *Estimation of Natural Groundwater Recharge* uma aplicação desta técnica ao estudo do aquífero de Rio Maior. Os autores utilizaram uma cota-secção de referência do aquífero para avaliarem a descarga natural afluente ao rio Maior (que drena totalmente o aquífero nesta região). Utilizaram posteriormente o valor da recarga calculado para calibração do modelo BALSEQ, também aplicado ao aquífero de Rio Maior.

2.2.9 Controlo dos Caudais de Nascentes

O controlo dos caudais de nascentes dá um valor por defeito da infiltração existente na área de alimentação dessas nascentes. Dividindo pela área de alimentação obtém-se o valor de infiltração.

2.2.10 Avaliação da Recarga de Aquíferos usando a Modelação Estocástica Inversa

O objectivo da modelação estocástica inversa, aplicada à hidrogeologia, consiste na identificação de diversas distribuições regionais de sistemas aquíferos, nomeadamente das suas transmissividades, alturas piezométricas e recarga natural. As considerações básicas da teoria,

desenvolvida por DAGAN (1982) e RUBIN e DAGAN (1987a, b) são as seguintes: o logaritmo neperiano da transmissividade, Y, é uma função regional estacionária normal, o aquífero não é limitado, e adopta-se uma aproximação de primeira ordem para a equação do escoamento. Considera-se que o valor esperado da altura piezométrica H, bem como o da função de autocovariância incondicional de Y, têm expressões analíticas que dependem de um vector de parâmetros, θ. A solução proposta do problema inverso consiste na identificação de θ com base no modelo e nas medições de Y e de H, empregando o método da máxima verosimilhança, e em seguida avaliar os momentos estatísticos de Y e de H, condicionados aos mesmos dados. Um estudo inicia-se, em geral, pela análise dos dados e identificação dos registos anómalos (*outliers*) das medições, seguindo-se a identificação incondicional de θ e a avaliação da recarga, e termina com a elaboração de mapas regionais de Y e H condicionados e dos erros de estimação.

Em RUBIN *et al.* (1990) exemplifica-se uma aplicação deste método para avaliação da recarga da secção norte do aquífero de Rio Maior. Um pequeno número de resultados de ensaios de bombagem, permitindo calcular transmissividades locais, por um lado, e uma relativa abundância de medições de alturas piezométricas ao longo do tempo, por outro, conduziram ao delinear de um problema de identificação, no quadro da modelação estocástica inversa. Na parte superior da Fig. 2.6 apresenta-se a série temporal da recarga calculada por RUBIN *et al.* (1990) para a secção norte do aquífero de Rio Maior, de Janeiro de 1985 a Junho de 1986. Na parte inferior da mesma figura, para facilitar a comparação visual, apresenta-se a série temporal equivalente da precipitação registada em Rio Maior.

A recarga da secção norte do aquífero de Rio Maior pode ser considerada como a drenância de cerca de uma centena de metros de formações de lenhites e diatomitos sobrejacentes ao aquífero (confinado nesta secção e também com cerca de uma centena de metros de possança) de areias brancas cauliníferas. Os baixos valores calculados para a recarga justificam-se assim como correspondentes à drenância da formação aquitarda superior para o aquífero confinado. Nota-se um desfasamento de cerca de dois meses entre os picos de precipitação e os picos calculados para a recarga.

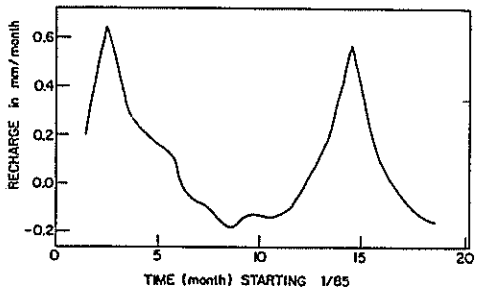
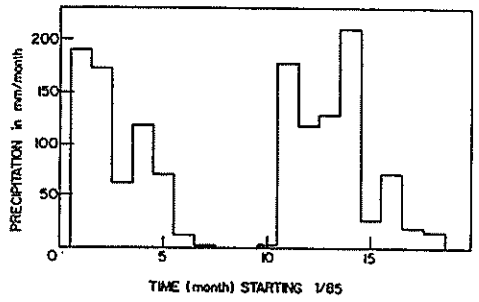


Fig. 2.6 - Exemplo de aplicação da modelação estocástica inversa para avaliação da recarga da secção norte do aquífero de Rio Maior

A) Série temporal da recarga calculada por modelação estocástica inversa, de Jan. 85 a Jun. 86

Valores em mm/mês



B) Série temporal da precipitação registada em Rio Maior, de Jan. 85 a Jun. 86

Valores em mm/mês

(Figura extraída de RUBIN *et al.*, 1990)

3. SÍNTESE CONCLUSIVA SOBRE A APLICAÇÃO DE MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE RECARGA DE AQUÍFEROS

Foram analisados neste Capítulo Segundo diversos métodos e apresentados resultados de estudos de avaliação da recarga de aquíferos.

Em Portugal, embora tendo já sido aplicados a maioria dos métodos anteriormente apresentados, observa-se uma maior aplicação dos métodos de balanços hídricos sequenciais, do método de balanços de cloretos e, mais recentemente, o método da decomposição de hidrogramas. Na vizinha Espanha, tem sido aplicado, com frequência, o método do balanço de trítio.

É agora importante o desenvolvimento de estudos de calibração de métodos de avaliação da recarga regional de aquíferos, nomeadamente dos métodos desenvolvidos no LNEC (*cf.* VERMEULEN *et al.* (1993 e 1994), OLIVEIRA *et al.* (1997a e 1997b) e OLIVEIRA, 1997), para permitir a comparação dos seus resultados com os obtidos por outras técnicas de avaliação da recarga de aquíferos, nomeadamente das descritas anteriormente, no Capítulo Segundo. No Capítulo Nono desenvolve-se este tema na perspectiva da continuação, aprofundamento, calibração e validação de métodos de avaliação da recarga de aquíferos.

4. FUNDAMENTOS, CONCEITOS E MÉTODOS DE CÁLCULO DA VULNERABILIDADE À POLUIÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

4.1 Considerações Gerais

O Grupo de Trabalho sobre Águas Subterrâneas do Instituto Europeu da Água reuniu-se em Fevereiro de 1991, em Bruxelas, para a (então) Comissão das Comunidades Europeias (CCE-DG XI), a fim de estabelecer um acordo sobre as metodologias a empregar para elaboração dos novos mapas comunitários dos recursos hídricos subterrâneos dos Estados-membros. Um primeiro inventário tinha sido já desenvolvido entre 1979 e 1981, para os então nove Estados-membros da Comunidade Económica Europeia. A CCE pretendia, em 1991, actualizar o primeiro inventário, efectuado na década de 70 e início da década de 80, para incluir dados relativos aos novos Estados-membros e novas regiões, *i.e.* de Portugal, de Espanha e dos cinco novos *Länder* da República Federal da Alemanha.

O novo inventário deveria incluir os aspectos quantitativos das águas subterrâneas, os dados de consumos e ainda a vulnerabilidade à poluição. Uma limitação importante apontada por diversos peritos nacionais relacionava-se com a disparidade de critérios usados para elaboração dos mapas nacionais, independentemente dos méritos individuais de cada um, por não serem comparáveis entre si. Exemplos apresentados de análises "clássicas" da vulnerabilidade à poluição incluíram os de França, publicada pelo BRGM (*cf.* PARASCANDOLA, 1979), os da Alemanha, por AUST *et al.* (1980), os da Dinamarca, por VILLUMSEN *et al.* (1982), os das regiões do Alentejo e do Algarve, por LOBO-FERREIRA e CALADO (1989), e os do estudo de alguns Estados-membros para a CEE (FRIED, 1987). Todos esses mapas consideravam diversas (geralmente três ou quatro) classes de vulnerabilidade (e.g. alta, média e baixa), mas os parâmetros seleccionados e os critérios de priorização/ordenamento usados eram diferentes.

Foi então decidido que seria necessário uniformizar os critérios e os procedimentos a usar em cada Estado-membro, para avaliar, classificar, e mapear a vulnerabilidade à poluição das águas subterrâneas. Foi solicitada, na reunião, que cada participante, de cada Estado-membro, apresentasse uma proposta com uma "**definição operacional de vulnerabilidade à poluição**". A proposta portuguesa foi resumida em LOBO-FERREIRA e CABRAL (1991).

O estudo comunitário referente a Portugal, foi desenvolvido pelo LNEC, de 1992 a 1995, tendo sido publicado em 1995 (*cf.* LOBO-FERREIRA *et al.*, 1995a,b,c). A experiência comunitária obtida com o projecto português foi estendida ao estudo piloto de Espanha, desenvolvido para os 63 000 km^2 da bacia do rio Guadalquivir. A escala de trabalho acordada foi 1:500 000. Para o mapeamento conjunto, global, dos Estados-membros da União Europeia foi proposta a escala 1:1 500 000. O mapa da vulnerabilidade DRASTIC das águas subterrâneas de Portugal Continental foi desenvolvido pelo LNEC, editado pela *Task Force* da Agência Europeia do Ambiente à escala 1:500 000, e publicado pelo LNEC à escala 1:1 500 000 em LOBO-FERREIRA *et al.* (1995a). Nessa edição os mapas de vulnerabilidade (*clássica*) das ilhas dos arquipélagos dos Açores e da Madeira foram publicados à escala 1:200 000, conforme acordado na reunião de Bruxelas, para as ilhas.

4.2 Alguns Métodos "Clássicos" Utilizados para Mapeamentos Nacionais ou Regionais da Vulnerabilidade à Poluição nas Décadas de 70 e 80

4.2.1 Mapa da Vulnerabilidade de Valence, França, pelo BRGM (1979)

No mapa de vulnerabilidade de Valence, França, publicado pelo BRGM em 1979 (*cf.* PARASCANDOLA *et al.*, 1979) foram consideradas quatro classes de vulnerabilidade: muito alta, alta, variável e baixa. Os principais factores considerados na avaliação foram os seguintes:

a) o valor actual do aquífero como fonte de abastecimento de água;

b) a capacidade de protecção relativa a poluentes provenientes da superfície do solo;

c) o tempo de percurso do poluente da superfície do solo até ao aquífero; e

d) a persistência do poluente no aquífero.

A categoria de vulnerabilidade "muito alta" aplica-se, assim, a regiões caracterizadas por:

- aquíferos extensos que são intensamente utilizados para abastecimento de grandes aglomerados populacionais ou de grandes indústrias;
- protecção reduzida em relação a poluentes provenientes da superfície do solo;
- elevada permeabilidade devido a fracturas, fissuras ou carsificação, com velocidades de

propagação dos poluentes da ordem de vários metros por dia; e

- elevada persistência dos poluentes no aquífero.

4.2.2 Os Mapas de Vulnerabilidade do Reino Unido

4.2.2.1 Mapas Editados pelo Institute of Geological Sciences em 1983

Os mapas de vulnerabilidade do Reino Unido, editados pelo Institute of Geological Sciences, em 1983, consideram quatro classes de vulnerabilidade à poluição e ainda três categorias que representam as áreas de vulnerabilidade variável, as áreas com informação insuficiente e as áreas com ausência de aquíferos. A classificação baseia-se num parâmetro único, que é o tempo de percurso de um poluente conservativo, não-adsorvível e não-absorvível, através da zona não-saturada do solo. As quatro classes de vulnerabilidade correspondem a tempos de percurso "superiores a 20 anos", "entre 1 ano e 20 anos", "entre 1 ano e 1 semana" e "menos do que uma semana".

4.2.2.2 Mapas Publicados pelo National Rivers Authority em 1996

Os novos mapas de vulnerabilidade de Inglaterra e do País de Gales, à escala 1:100 000 foram publicados pelo National Rivers Authority.

Esta série de mapas mostra os aquíferos de Inglaterra e do País de Gales, classificados de acordo com as propriedades das formações rochosas e dos solos sobrejacentes.

De acordo com o National Rivers Authority (NRA), o formato a cores dos códigos escolhidos facilita a leitura imediata da classe de vulnerabilidade da área em análise. Por exemplo, onde um aquífero está localizado perto da superfície e é coberto apenas por um camada fina, permitindo uma infiltração fácil, uma cor púrpura indica vulnerabilidade alta. A água subterrânea é contida em estratos aquíferos de vários tipos. De acordo com o NRA, em Inglaterra e no País de Gales é em geral de elevada qualidade, mas é vulnerável à poluição e uma vez contaminada é de difícil reabilitação. Portanto a prevenção da poluição é particularmente importante. A nova série de 53 mapas (em Janeiro de 1996 estavam disponíveis para compra 22 folhas, *cf.* http://www.geopubs.co.uk/section2/grndwat.html) é publicada pelo NRA como uma ferramenta importante para poder implementar a "*Policy and Practice for the Protection of Groundwater*". Cada carta possui um texto explicativo dos

princípios envolvidos, as classificações geológica e pedológica, e uma legenda mostrando as classes de vulnerabilidade. De acordo com o NRA, esses mapas fornecem uma informação esclarecedora de um bem valioso; cerca de 35% da água destinada ao consumo público em Inglaterra e no País de Gales são provenientes de recursos hídricos subterrâneos.

4.2.3 O Mapeamento "Clássico" da Vulnerabilidade à Poluição de Portugal Continental

No âmbito dos estudos da Carta Hidrogeológica da Orla Algarvia, desenvolvida pelos Serviços Geológicos de Portugal e publicada em COSTA *et al.* (1985), apresenta-se o mapeamento da vulnerabilidade à poluição da Orla Algarvia dividido em sete classes de vulnerabilidade: "*muito alta*", "*alta*", "*média a alta*", "*média*", "*média a baixa*", "*baixa*" e "*muito baixa*". Nesse mapeamento apresenta-se ainda a localização de pedreiras, de cemitérios, de descargas directas de efluentes, da poluição industrial e de redes de saneamento urbano. A carta é denominada de Risco de Contaminação.

No mapeamento "**clássico**" da vulnerabilidade à poluição do Algarve e do Alentejo, por LOBO-FERREIRA e CALADO (1989), consideram-se quatro classes de vulnerabilidade à poluição: "*muito grande*" (com sub-divisão em duas classes, V1a e V1b), "*grande*" (com sub-divisão em duas classes, V2a e V2b), e "*vulnerabilidade muito variável*" (classe V3). Os factores considerados na avaliação e na classificação são equivalentes, embora não iguais, aos apresentados para os mapeamentos francês ou inglês. Os factores considerados foram apenas de natureza hidrogeológica, sintetizados na "**Carta litológica para fins hidrogeológicos de Portugal Continental**", publicada por DELGADO-RODRIGUES *et al.* (1989).

Na Fig. 2.7, extraída de LOBO-FERREIRA e OLIVEIRA (1993), apresenta-se o mapeamento da vulnerabilidade "**clássica**" de Portugal Continental, interpretado para o território de Portugal Continental com base na carta litológica publicada por DELGADO-RODRIGUES *et al.* (1989) e nos trabalhos, desenvolvidos às escalas 1:500 000, publicados por LOBO-FERREIRA e CALADO (1989) para as regiões do Algarve e do Alentejo, e por NOVO *et. al.* (1991) para a Região Centro.

4.3 Conclusões em Relação aos Métodos Clássicos Revistos Anteriormente para Mapeamento da Vulnerabilidade à Poluição

4.3.1 Mapa de Vulnerabilidade de Valence, França

O conceito de vulnerabilidade utilizado para elaboração do mapa de vulnerabilidade de Valence, França, publicado pelo BRGM em 1979, é claramente de natureza composta, demasiado vasto, misturando conceitos distintos, e confundindo-o com resiliência. Também se consideram, indistintamente, factores estáticos e factores dinâmicos.

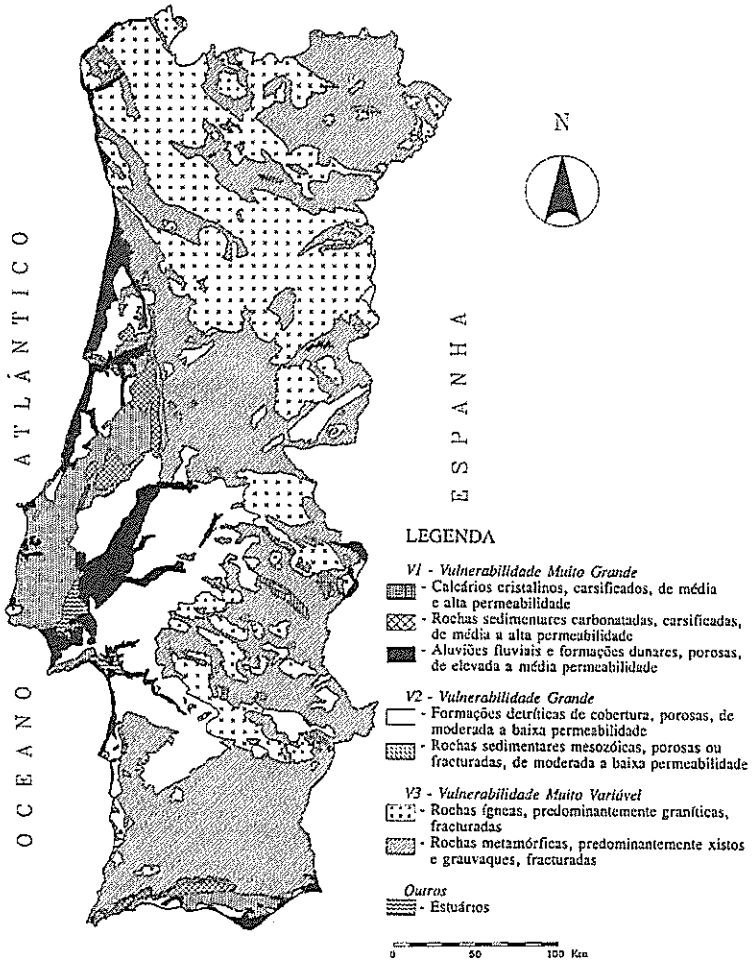


Fig. 2.7 - Mapeamento da vulnerabilidade "clássica" à poluição das águas subterrâneas de Portugal Continental

(Figura extraída de LOBO-FERREIRA e OLIVEIRA, 1993)

4.3.2 Os Mapas de Vulnerabilidade do Reino Unido

Os autores dos mapas de vulnerabilidade do Reino Unido editados pelo *Institute of Geological Sciences* em 1983, apontaram algumas limitações a este sistema de classificação:

a) O sistema conduz a erros de avaliação em casos com áreas de aquíferos confinados de

pequena espessura (e relativamente superficiais). Neste casos o sistema classifica estes aquíferos como muito vulneráveis uma vez que o tempo de percurso é reduzido. No entanto, esses aquíferos podem estar relativamente bem protegidos por camadas confinantes superiores que, embora sejam finas, podem ser praticamente impermeáveis.

b) Assim os autores referem que "*most bodies in the United Kingdom who are responsible for the management of aquifers and groundwater resources do not accept this definition of aquifer vulnerability.*"

4.3.3 Mapeamento "Clássico" da Vulnerabilidade à Poluição das Regiões do Algarve e do Alentejo

O mapeamento "clássico" da vulnerabilidade à poluição das regiões do Algarve e do Alentejo", por LOBO-FERREIRA e CALADO (1989) baseou-se em considerações (*apenas*) do tipo geológico. Os autores consideraram assim este mapeamento como preliminar, a ser optimizado num posterior estudo de maior abrangência e actualidade conceptual que classificasse a vulnerabilidade das zonas que os autores mapearam como de "*vulnerabilidade muito variável*". No entanto, os resultados alcançados nos estudos referidos, co-financiados pela ex-Direcção-Geral da Qualidade do Ambiente e pelo LNEC, estavam, conceptualmente, a par dos restantes estudos comunitários desenvolvidos nas décadas de 70 e de 80, que visavam o mapeamento da vulnerabilidade à poluição das águas subterrâneas da CEE.

4.4 Novos Conceitos para a Definição da Vulnerabilidade de Águas Subterrâneas à Poluição

Antes de se iniciar um novo mapeamento da vulnerabilidade à poluição das águas subterrâneas dos Estados-membros da CEE, foi necessário precisar e definir melhor o conceito "vulnerabilidade".

O termo vulnerabilidade foi definido e usado anteriormente no domínio dos recursos hídricos, nomeadamente no contexto da avaliação do desempenho de sistemas hídricos. Refere-se em seguida o trabalho de HASHIMOTO *et al.* (1982). Esses autores apresentam uma análise do desempenho de sistemas, focando o problema do risco de colapso. Definem três conceitos que possibilitam a avaliação do desempenho de sistemas: (1) "how likely the system is to fail is measured by its *reliability*" (*i.e.* a *fiabilidade* mede a probabilidade de não colapso do

sistema); (2) "how quickly the system returns to a satisfactory state once a failure has occurred is expressed by its *resiliency*" (*i.e.* a *resiliência* mede a facilidade de retorno do sistema a um estado satisfatório); e (3) "how severe the likely consequences of failure may be is measured by its *vulnerability*" (*i.e.* a *vulnerabilidade* mede a severidade das consequências dum colapso do sistema). Este conceito de vulnerabilidade, definido no contexto do desempenho de sistemas, pode ser utilizado também no contexto da poluição das águas subterrâneas, substituindo "colapso do sistema" por "carga poluente". A dimensão das consequências é avaliada em função da deterioração da qualidade da água, independentemente do aquífero ser usado, ou não ser usado, para abastecimento público ou para qualquer outro fim.

O conceito de vulnerabilidade ainda não foi definido completamente e sem ambiguidades no contexto da poluição das águas subterrâneas. Frequentemente, o termo "*vulnerabilidade à poluição*" é usado com um sentido composto que talvez pudesse melhor ser descrito como "*risco de poluição*".

LOBO-FERREIRA e CABRAL (1991) defenderam que nos novos estudos comunitários fosse utilizada a definição mais restrita de vulnerabilidade, de acordo com as conclusões e recomendações da conferência internacional sobre "Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants" realizada na Holanda, em 1987 (DUIJVENBOODEN e WAEGENINGH (*Ed.*), 1987):

a sensibilidade da qualidade das águas subterrâneas a uma carga poluente, função apenas das características intrínsecas do aquífero.

Definida deste modo vulnerabilidade é distinta de risco de poluição. O risco de poluição depende não só da vulnerabilidade mas também da existência de cargas poluentes significativas que possam entrar no ambiente subterrâneo.

É possível existir um aquífero com um alto índice de vulnerabilidade mas sem risco de poluição, caso não haja carga poluente, ou de haver um risco de poluição excepcional apesar do índice de vulnerabilidade ser baixo. É importante precisar a diferença entre *vulnerabilidade* e *risco de poluição*. O risco é causado não apenas pelas características intrínsecas do aquífero, muito estáveis, mas também pela existência de actividades poluentes, factor dinâmico que, em princípio, pode ser controlado.

Episódios graves de poluição de águas subterrâneas e as suas consequências na qualidade do ambiente ou no grau de perturbação do abastecimento público não são, deliberadamente,

consideradas na definição de vulnerabilidade.

4.5 Sistema de Vulnerabilidade Proposto para o Novo Mapeamento (Comparável) da Vulnerabilidade à Poluição das Águas Subterrâneas dos Estados-Membros da CEE (1991)

Definido o conceito de vulnerabilidade é importante reconhecer que a vulnerabilidade de um aquífero depende também do tipo de poluente potencial. Por exemplo a qualidade da água subterrânea pode ser muito vulnerável a uma carga de nitratos, originada por práticas agrícolas incorrectas, e no entanto ser pouco vulnerável a cargas patogénicas (devido à mortalidade natural dos agentes patogénicos). Tendo em consideração esta realidade é cientificamente defensável avaliar a vulnerabilidade à poluição em relação a casos específicos de poluição, como nutrientes, poluição de origem orgânica, metais pesados, etc., *i.e.* criar o conceito de *vulnerabilidade específica.*

Este ponto de vista foi já expresso por diversos autores, nomeadamente por FOSTER (1987). Trabalhos de mapeamento específico da vulnerabilidade foram desenvolvidos por CANTER *et al.* (1987), para a poluição por nitratos de origem agrícola. Em alternativa, os mapas de vulnerabilidade podem ser desenvolvidos para *grupos de actividades poluentes*, de acordo com FOSTER (1987), por exemplo, pela ausência de saneamento básico, pela agricultura e por certas indústrias. LE GRAND (1983) apresentou, num trabalho interessante, uma metodologia de abordagem e quantificação do risco de poluição proveniente de aterros sanitários.

Reconhecendo que o mapeamento específico de vulnerabilidade é do ponto de vista científico mais consistente, verifica-se no entanto que em geral o número de dados disponível não é suficiente para a elaboração do mapeamento específico. Tornou-se assim necessário optar por conceitos mais adequados à utilização dos dados (em geral) disponíveis. Foram propostos vários sistemas de avaliação e de mapeamento da vulnerabilidade, como por exemplo por ALBINET e MARGAT (1970), HAERTLE (1983), ALLER *et al.* (1987) e FOSTER (1987).

Alguns desses sistemas incluem *índices de vulnerabilidade* formados por parâmetros hidrogeológicos, morfológicos e outras formas de parametrização das características dos aquíferos, de um modo bem definido. A adopção de índices de vulnerabilidade tem a vantagem, em princípio, de eliminar ou minimizar a subjectividade inerente aos processos de

avaliação.

Um índice deste tipo tinha já sido estudado nos Estados Unidos: o índice DRASTIC, desenvolvido por ALLER *et al.* (1987) para a Agência de Protecção Ambiental dos Estados Unidos (*EPA*). Diversos estudos desenvolvidos já na década de 90, nomeadamente nos EUA, no Canadá, na África do Sul, em Itália, e na Suécia utilizaram com sucesso, o índice DRASTIC. De facto, o índice DRASTIC tem as características de simplicidade e utilidade necessárias para poder vir a ser considerado uma referência. Outros índices que também têm características de coerência e simplicidade são os índices GOD, AVI e SEEPAGE, desenvolvidos, respectivamente, no Reino Unido, no Canadá e nos Estados Unidos. Estes índices são brevemente apresentados nos pontos seguintes.

4.6 O Índice de Vulnerabilidade à Poluição GOD

De acordo com FOSTER (1987) o índice de vulnerabilidade à poluição GOD considera os três seguintes parâmetros:

1. Ocorrência de águas subterrâneas (**G**roundwater occurrence), *i.e.*, se o aquífero é livre, semi-confinado, confinado, etc. (se houver aquífero);
2. Classe global do aquífero (**O**verall aquifer class) em termos do grau de consolidação e das características litológicas;
3. Profundidade ao nível freático ou espessura ao tecto do aquífero (**D**epth to groundwater table or strike).

(O nome GOD é um acrónimo resultante das iniciais, em inglês, da primeira letra de cada parâmetro).

O aquífero é classificado, em relação a cada um dos três parâmetros, numa escala cujo valor máximo é a unidade. O índice é calculado pela multiplicação dos três parâmetros. O valor máximo do índice é 1.0, representando uma vulnerabilidade máxima. O menor valor é 0.016 se houver aquífero, ou zero se não houver aquífero. O valor de cada parâmetro é fácil de obter, se se seguir o procedimento apresentado por FOSTER (1987). O valor de um parâmetro qualificativo complementar é adicionado ao valor numérico do índice. Este parâmetro complementar pretende considerar o grau de fissuração e a capacidade de atenuação, medindo a tendência ou a propensão para o transporte lateral do poluente na zona saturada. Este método

foi aplicado no México. Foram salientados por autores britânicos alguns problemas inerentes à fórmula matemática (multiplicativa) utilizada no índice GOD, que tornariam a análise do resultado final difícil. Assim, ao que se sabe este método não foi empregue pelos serviços oficiais do Reino Unido.

4.7 O Índice de Vulnerabilidade à Poluição AVI

O National Hydrology Research Institute (NHRI) em Saskatoon, Saskatchewan, Canadá, desenvolveu o método do índice AVI (Aquifer Vulnerability Index) para o mapeamento da protecção de águas subterrâneas. Esta técnica foi aplicada a uma porção da região fronteiriça das províncias canadianas de Saskatchewan-Alberta por VAN STEMPVOORT *et al.* (1992). Esse estudo envolveu a compilação da estratigrafia, a identificação dos aquíferos, e o cálculo do índice AVI para aproximadamente 2 000 logs de captações de águas subterrâneas disponíveis para a área piloto estudada.

4.8 O Índice de Vulnerabilidade à Poluição DRASTIC

4.8.1 Apresentação Geral

O índice DRASTIC corresponde à média ponderada de 7 valores correspondentes aos seguintes 7 parâmetros ou indicadores hidrogeológicos:

1 - Profundidade da zona não-saturada do solo (**D**epth to the water table)

2 - Recarga profunda de aquíferos (Net **R**echarge)

3 - Material do aquífero (**A**quifer material)

4 - Tipo de solo (**S**oil type)

5 - Topografia (**T**opography)

6 - Impacto da zona não-saturada (**I**mpact of the unsaturated zone)

7 - Condutividade hidráulica (Hydraulic **C**onductivity)

(O nome DRASTIC é um acrónimo resultante da junção das letras sublinhadas dos parâmetros, em inglês).

4.8.2 Fundamentos

O método DRASTIC fundamenta-se num conjunto de procedimentos que permitem integrar vários parâmetros caracterizadores do meio subterrâneo e da sua especificidade. Cada um dos sete parâmetros DRASTIC foi dividido quer em escalas quer em tipos de meio significativos que condicionam o potencial de poluição. Sintetiza-se em seguida a aplicação do método DRASTIC:

1. atribuem-se valores de 1 a 10 a cada parâmetro, em função das condições locais; valores elevados correspondem a uma maior vulnerabilidade; os valores a atribuir obtêm-se de tabelas que consideram a correspondência entre as características hidrogeológicas locais e o respectivo parâmetro;

2. em seguida o índice local é calculado multiplicando o valor atribuído ao parâmetro pelo seu peso relativo, cada parâmetro tem um peso pré-determinado que reflecte a sua importância relativa na quantificação da vulnerabilidade; os parâmetros mais importantes têm um peso 5, os menos importantes um peso 1; estão disponíveis duas gamas de pesos relativos ou factores de ponderação; uma gama para aplicação *geral* ou *padrão* (que se designará apenas por DRASTIC) e outra específica para *pesticidas* (que se designará por DRASTIC *pesticidas*):

	DRASTIC	DRASTIC *pesticidas*
(a)- Profundidade da zona não-saturada do solo	5	5
(b)- Recarga profunda de aquíferos	4	4
(c)- Material do aquífero	3	3
(d)- Tipo de solo	2	5
(e)- Topografia	1	3
(f)- Impacto da zona não-saturada	5	4
(g)- Condutividade hidráulica	3	2

3. por último adicionam-se os sete produtos parciais obtendo-se o valor do índice final DRASTIC; o valor mínimo possível para o DRASTIC é 23, sendo 226 o valor máximo; o valor mínimo possível para o DRASTIC *pesticidas* é 26, sendo 256 o valor máximo. Segundo ALLER *et al.* (1987) valores dessa ordem de grandeza são raros situando-se geralmente entre 50 e 200.

4.8.3 A Variante Italiana SINTACS

De acordo com CIVITTA *et al.* (1990), para uma melhor avaliação da vulnerabilidade a escala pequena, como requerido pela estrutura hidrogeológica italiana altamente diversificada, foi desenvolvido em Itália, por esses autores, uma variante do método DRASTIC. As sete propriedades usadas no método DRASTIC também são usadas no SINTACS (SINTACS e DRASTIC são acrónimos das mesmas palavras, em italiano e em inglês). De acordo com KIMURA (1997, *cf.* http://www.ce.utexas.edu/stu/kimura/gis) a especificidade do SINTACS é a seguinte: (1) cada um dos sete parâmetros é avaliado com um par associado de propriedades e (2) os pesos são gerados por um algoritmo que toma em consideração condições locais (*e.g.* utilização do solo).

O método SINTACS foi apresentado em Portugal por NAPOLITANO (1995). A autora refere que no método SINTACS a área em análise é discretizada em elementos finitos quadrangulares. O índice de vulnerabilidade é definido em cada elemento usando a fórmula:

$$I_V = \sum P_{(1-7)} * W_{(1,n)} \qquad (32)$$

onde $P_{(1-7)}$ é o valor de cada parâmetro usado e $W_{(1,n)}$ é o peso da sua classe, que varia de 1 a n.

4.9 O Índice de Vulnerabilidade à Poluição SEEPAGE

O modelo *System for Early Evaluation of Pollution Potential of Agricultural Groundwater Environments (SEEPAGE)* é uma combinação de três modelos que foram adoptados nos EUA pelo *Natural Resources Conservation Service* (*cf.* RICHERT *et al.* 1992, ENGEL *et al.* 1992 *in* http://soils.ecn.purdue.edu/~aggrass/GROUNDWATER/seepage.html). O SEEPAGE considera diversas situações hidrogeológicas e diversas propriedades físicas do solo que afectam o potencial de vulnerabilidade das águas subterrâneas. O modelo considera que a contaminação pode ser proveniente de fontes concentradas ou de fontes difusas e quantifica os seguintes parâmetros:

1) Inclinação do solo

2) Profundidade ao nível freático

3) Material da zona vadosa

4) Material do aquífero

5) Espessura do solo

6) Potencial de atenuação

O potencial de atenuação considera ainda os seguintes factores:

a) Textura da superfície do solo

b) Textura do subsolo

c) pH do estrato superficial

d) Conteúdo em matéria orgânica do estrato superficial

e) Classe de drenagem do solo

f) Permeabilidade do solo (do estrato menos permeável)

A cada factor é atribuído um valor (*peso*) numérico que pode variar de 1 a 50, baseado na sua importância relativa, sendo 1 o de menor importância. Os *pesos* são diferentes conforme se trate de poluição pontual ou de poluição difusa. De modo semelhantes ao método DRASTIC, cada factor pode ser dividido em *ratings* que variam de 1 a 50. Os *ratings* do material do aquífero e da zona vadosa são subjectivos e podem ser modificados para uma região particular. Calculados os seis factores, adicionam-se para se obter o *SEEPAGE Index Number (SIN)*. Um valor elevado de SIN implica uma vulnerabilidade acrescida do sistema de águas subterrâneas à poluição. Tal como no índice DRASTIC, os números SIN são distribuídos por quatro categorias de potencial de poluição: "baixo" (*low*), "moderado" (*moderate*), "alto" (*high*) e "muito alto" (*very high*). As áreas que se localizam nas categorias "alto" e "muito alto" devem receber prioridade máxima quando se desenvolve e aplica o código de *Best Management Practices*.

5. A EXPERIÊNCIA DO LNEC EM ESTUDOS DE AVALIAÇÃO E MAPEAMENTO DA RECARGA DE AQUÍFEROS E DA VULNERABILIDADE DRASTIC À POLUIÇÃO

5.1 Introdução ao Inventário das Águas Subterrâneas de Portugal Desenvolvido no LNEC

Foi publicada em 1995, uma edição em três volumes, de uma colectânea de Relatórios elaborados pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), no âmbito dos Contratos B-4-3042/91/15935 e B-4-3040/93/426 da Direcção-Geral do Ambiente, Segurança Nuclear e Protecção Civil (DGXI/B/1) da Comissão Europeia, e de diversos Protocolos celebrados com a Direcção-Geral do Ambiente (DGA, ex-Direcção-Geral da Qualidade do Ambiente, DGQA), com a Secretaria Regional de Habitação e Obras Públicas da Região Autónoma dos Açores e com o Laboratório Regional de Engenharia Civil da Região Autónoma da Madeira. **A coordenação científica do Projecto comunitário esteve a cargo do autor.** A colectânea foi dividida em três Volumes: (Vol. 1) LOBO-FERREIRA *et al.* (1995a); (Vol. 2) LOBO-FERREIRA *et al.* (1995b); (Vol. 3) LOBO-FERREIRA *et al.* (1995c). **A tiragem de 200 exemplares, desta Colectânea de 1581 páginas, pelo interesse que suscitou no meio técnico nacional, esgotou-se em 1998.**

Constituiu objectivo principal do trabalho o desenvolvimento de um inventário das Águas Subterrâneas de Portugal, contendo (1) a caracterização dos sistemas hidrogeológicos, (2) a avaliação dos recursos hídricos subterrâneos, quer renováveis, *i.e.* recargas regionais de aquíferos, quer reservas hídricas subterrâneas contidas nos sistemas hidrogeológicos, (3) a caracterização das utilizações, (4) a elaboração de mapas em Sistema de Informação Geográfica dos sistemas hidrogeológicos, da recarga regional de aquíferos, da vulnerabilidade DRASTIC à poluição, incluindo a dos diversos parâmetros necessários à sua avaliação e (5) a análise de legislação internacional para protecção de recursos hídricos subterrâneos.

Elaborou-se em 1993, no âmbito deste Projecto, a primeira base de dados hidrogeológicos a nível nacional, que se denominou INVENTAR. Em 1999, a base INVENTAR e as bases específicas criadas a partir dela, e.g. <INVENTAR PBHTEJO>, contém no seu conjunto cerca de 10 000 pontos de águas subterrâneas.

A contribuição financeira nacional para o Projecto foi efectuada no âmbito de diversos protocolos celebrados entre a DGA e o LNEC, nomeadamente para a caracterização e o mapeamento das águas subterrâneas e da vulnerabilidade (clássica) à poluição das formações aquíferas das Regiões do Algarve e do Alentejo e da Região Centro, e para a caracterização do estado das águas subterrâneas em relação à poluição causada por nitratos. O mapeamento desenvolvido no Projecto foi executado em estreita articulação com a DGA, nomeadamente para a elaboração dos mapas, na DGA, em Sistema de Informação Geográfica ARC/INFO. São de referir também os contributos do Instituto da Água (INAG, ex-Direcção-Geral dos Recursos Naturais, DGRN) na fase de concepção da base de dados INVENTAR e o das Direcções-Regionais do Ambiente e Recursos Naturais (DRARNs), nomeadamente das Direcções-Regionais do Ambiente e Recursos Naturais de Lisboa e Vale do Tejo (DRARNLVT), do Centro (DRARNC), do Algarve (DRARNAlgarve) e do Alentejo (DRARNAlentejo) pela cedência dos dados necessários ao preenchimento da base de dados INVENTAR.

Os resultados alcançados foram apresentados em: (1) LOBO-FERREIRA e CALADO (1989); (2) DELGADO RODRIGUES e ROQUE (1990); (3) NOVO *et al.* (1991); (4) LOBO-FERREIRA (1991); (5) LOBO-FERREIRA e OLIVEIRA (1993a); (6) LOBO-FERREIRA e OLIVEIRA (1993b); (7) LOBO-FERREIRA *et al.* (1994); (8) LOBO-FERREIRA e OLIVEIRA (1994); (9) NOVO *et al.* (1994a); (11) CIABATTI e LOBO-FERREIRA (1994); (12) NOVO (1994); (13) OLIVEIRA e LOBO-FERREIRA (1994); e (14) MOINANTE *et al.* (1994).

No âmbito destes Projectos, foram desenvolvidos e digitalizados à escala 1:500 000, em ficheiros ARC/INFO, diversos mapas de que se realçam os seguintes: (1) Mapeamento dos Aquíferos de Portugal Continental, (2) Parâmetros Hidrogeológicos de Portugal Continental, (3) Recarga Potencial Média dos Aquíferos de Portugal Continental e (4) Vulnerabilidade DRASTIC dos Aquíferos de Portugal Continental. Na Fig. 2.8 apresenta-se o mapa final da vulnerabilidade DRASTIC dos aquíferos de Portugal Continental, calculado por LOBO-FERREIRA e OLIVEIRA (1993) à escala 1:500 000, publicado em LOBO-FERREIRA *et al.* (1995) à escala 1:1 500 000.

5.2 As Águas Subterrâneas da Faixa Costeira Litoral e a Vulnerabilidade dos seus Aquíferos à Poluição

5.2.1 Objectivos do Estudo

No âmbito do Protocolo de Cooperação celebrado entre o Instituto de Hidráulica e Recursos Hídricos da Universidade do Porto (IHRH) e o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), foi desenvolvido para o Fundo de Coesão da UE, o estudo intitulado "**Study For Evaluation of The Vulnerability of the Reception Capacity of Coastal Zone Water Resources in Portugal. The Receiving Water Bodies: Groundwater Systems**". O relatório final do estudo foi publicado em LOBO-FERREIRA *et al.* (1995d). No âmbito deste projecto foram ainda elaboradas as seguintes publicações: (1) OLIVEIRA e LOBO-FERREIRA (1994); (2) LOBO-FERREIRA *et al.* (1994); (3) LOBO-FERREIRA *et al.* (1995); (4) OLIVEIRA *et al.* (1996a); (5) DIAMANTINO e LOBO-FERREIRA (1996); (6) OLIVEIRA *et al.* (1996b).

O objectivo deste estudo consistiu, essencialmente, no desenvolvimento dos seguintes temas:

- Tema 1: "Caracterização geral, com incidência no meio subterrâneo, da faixa costeira litoral".

- Tema 2: " Caracterização da situação portuguesa em relação à exploração de águas subterrâneas, nos municípios da faixa costeira litoral".

- Tema 3: " Mapeamento das águas subterrâneas da faixa costeira litoral e da vulnerabilidade dos seus aquíferos à poluição".

Neste estudo, a faixa costeira foi definida como a área compreendida entre o mar e uma linha localizada a 5 km da costa, desenvolvendo-se de Caminha, na foz do rio Minho, a Vila Real de Sto. António, na foz do rio Guadiana.

Das conclusões de LOBO-FERREIRA *et al.* (1995d) extraem-se, em seguida, as secção mais relevantes para a elaboração deste Programa de Investigação.

5.2.2 Caracterização da Recarga de Aquíferos

Relembra-se que a ***recarga potencial*** traduz o volume de água subterrânea que seria incorporado nas reservas de uma formação geológica se esta tivesse capacidade de armazenamento suficiente para comportar toda a água de precipitação que ultrapassa o limite inferior da zona do solo sujeita a evapotranspiração, ou seja, traduz o volume de água médio anual disponível para recarregar os aquíferos, se estes forem explorados continuamente.

Nas zonas abrangidas por formações sedimentares, as recargas reais encontram-se próximas das recargas anuais potenciais apresentadas. Nas zonas de afloramentos de rochas do Maciço Antigo, fracturadas, ocorrentes principalmente a norte de Espinho, no Alentejo e, para o interior, no Algarve, estes valores encontram-se muito mais afastados das recargas reais.

Assim, tendo em conta que o armazenamento é muito pequeno, no Maciço Antigo há um esgotamento das reservas extraíveis num espaço de tempo inferior ao anual, podendo definir-se as reservas anuais extraíveis do Maciço Antigo como os recursos hídricos renováveis da região (MOINANTE *et al.*, 1994).

LOBO-FERREIRA *et al.* (1995d) sintetizam os valores de recarga (real) estimados, como ordem de grandeza, em cada concelho da faixa litoral onde aflorem, total ou parcialmente, formações do Maciço Antigo. Com base nos valores das extracções totais de água subterrânea e da recarga potencial anual média, estimaram ainda o balanço extracções-recarga, caracterizando cada concelho da faixa costeira de acordo com a taxa de exploração das águas subterrâneas, proposta por LOBO-FERREIRA e OLIVEIRA (1993b).

5.2.3 Mapeamento DRASTIC da Vulnerabilidade das Águas Subterrâneas à Poluição

5.2.3.1 Considerações Gerais

No âmbito do "**Estudo Preparatório para a Definição de Projectos de Ambiente Elegíveis no Contexto do Fundo de Coesão**" (para o Programa Comunitário LIFE da DG XII) LOBO-FERREIRA (1993c) propôs que o índice de vulnerabilidade DRASTIC fosse considerado um dos três indicadores ambientais de águas subterrâneas, a par com os indicadores quantitativos e qualitativos, na medida em que compreende sete parâmetros integrados relacionados com as

águas subterrâneas, salientando que o método possui características de simplicidade e de consistência de utilização adequadas ao caso português.

O código de cores utilizado neste Estudo, baseado em ALLER *et al.* (1987) permite fazer a seguinte ordenação da vulnerabilidade relativa DRASTIC da classe mais vulnerável para a classe menos vulnerável: vermelho, laranja, amarelo, verde claro, verde escuro, azul claro, azul escuro e rosa. De uma forma simples pode-se considerar que as classes representadas pelas **cor vermelha** (índice **DRASTIC superior a 199**) é uma classe de ***vulnerabilidade muito elevada***; que as classes com **cores amarela e laranja** (índice **DRASTIC entre 160 e 199**) são classes de ***vulnerabilidade elevada***; que as classes com as **cores verdes** (índice **DRASTIC entre 120 e 159**) apresentam ***vulnerabilidade intermédia***, e que as classes de **cores azuis e rosa** (índice **DRASTIC inferior a 120**) representam áreas com ***vulnerabilidade baixa.***

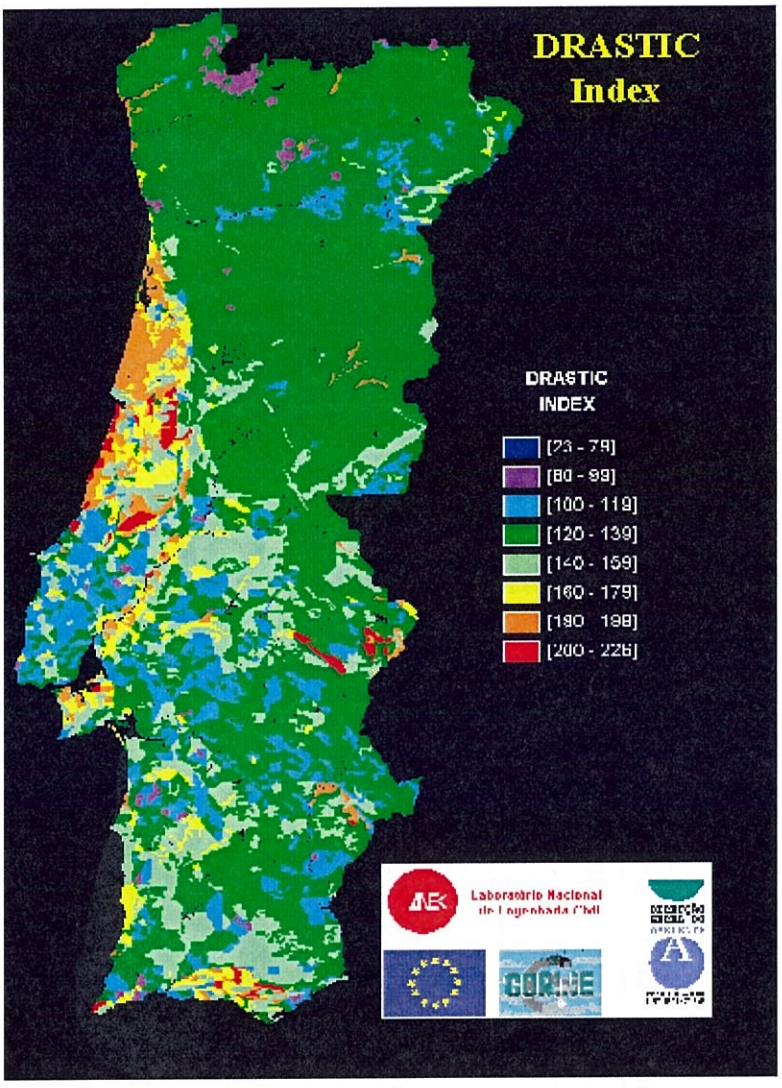


Fig. 2.8 - Mapeamento da vulnerabilidade à poluição desenvolvido para Portugal Continental pelo método DRASTIC por LOBO-FERREIRA e OLIVEIRA (1993), à escala 1:500 000

(Figura disponível em http://www-dh.lnec.pt/gias/novidades/nato97_vulner_internet.html)

5.2.3.2 Conclusões da Análise e Mapeamento DRASTIC da Vulnerabilidade à Poluição das Águas Subterrâneas da Zona Costeira de Portugal Continental

Visando ilustrar como se podem converter os resultados da aplicação do método DRASTIC para a **definição de zonas vulneráveis à poluição**, nomeadamente no âmbito da aplicação da **Directiva Nitratos**, apresentam-se as conclusões do estudo elaborado para a Zona Costeira de Portugal Continental:

1. Apesar do potencial de vulnerabilidade depender de outros factores, é possível relacionar, em grande parte dos casos, o índice DRASTIC com a geologia. Assim, as zonas mais vulneráveis relacionam-se com formações detríticas não consolidadas do Plio-quaternário, de natureza arenosa, ocorrendo em grandes áreas ao longo de toda a faixa costeira, com destaque especial para a região compreendida entre Espinho e a Nazaré, e para a faixa ao longo do litoral ocidental a sul do rio Tejo até ao cabo Sardão.

2. Igualmente de vulnerabilidade elevada ocorrem formações calcárias e dolomíticas carsificadas e/ou fracturadas, do Jurássico e do Cretácico, que se desenvolvem essencialmente no Algarve no cabo de S. Vicente e a E, em Almádena, a N de Estômbar, no Escarpão e numa área que se desenvolve entre S. Bartolomeu e SW de Castro Marim, mas também a W de Lisboa, na serra da Arrábida, a E de Sesimbra e a W de Santiago do Cacém.

3. As aluviões apresentam normalmente índices intermédios com excepção das aluviões do rio Cávado que apresentam índice de vulnerabilidade elevado.

4. Todas as restantes formações geológicas apresentam índice de vulnerabilidade intermédio a baixo. As áreas de afloramento de rochas do Maciço Antigo apresentam índice de vulnerabilidade intermédio a baixo na região norte e baixo no Algarve. Somente nas zonas de afloramento de quartzitos do Ordovícico, muito fracturados, na região norte, o índice é elevado.

5. As formações margosas e argilosas, ocorrendo extensamente no Algarve, em Bolhos-Serra d'El Rei, a W de Vimeiro, em Santa Cruz, em Sesimbra e a sul de Melides, apresentam índice de vulnerabilidade baixo.

5.3 Protocolo INAG-LNEC sobre "Cartografia Automática da Vulnerabilidade de Aquíferos com Base na Aplicação do Método DRASTIC"

Em OLIVEIRA *et al.* (1997a, 1997b) e OLIVEIRA e LOBO-FERREIRA (1998) apresentam-se os resultados do Protocolo de Cooperação estabelecido entre o INAG e o LNEC sobre o tema "Cartografia Automática da Vulnerabilidade de Aquíferos com base na Aplicação do Método DRASTIC".

Dado o interesse que tem a elaboração de mapas de vulnerabilidade de águas subterrâneas à poluição para a gestão do território, procurou-se no âmbito desse Protocolo desenvolver um conjunto de processos automáticos que permitissem obter os referidos mapas de vulnerabilidade.

Para o mapeamento automático da vulnerabilidade DRASTIC, OLIVEIRA *et al.* (1997a) desenvolveram um conjunto de 26 aplicações em *Arc Macro Language* (AML) que, utilizando o sistema de informação geográfica ARC/INFO®, permitem fazer a atribuição automática dos índices. Estas aplicações fazem o cálculo dos índices DRASTIC para a área correspondente a uma Carta Militar de Portugal (escala 1:25 000).

Para a utilização de processos automáticos ou semi-automáticos de elaboração da carta correspondente a cada parâmetro DRASTIC pressupõe-se a existência da seguinte informação:

- coberturas de base com as PAT (*Polygon Attribute Table*) contendo o atributo do tema;
- bases de dados contendo informação sobre pontos de água;
- tabelas de relacionamento entre o atributo do tema da PAT e o índice a atribuir ou que permitam o cálculo do índice do parâmetro em análise.

Para cada parâmetro do índice DRASTIC, as aplicações desenvolvidas permitem quatro opções básicas:

1. construir a carta utilizando procedimentos automáticos (ou, nalguns casos, semi-automáticos);
2. importar a carta já realizada;
3. visualizar a carta;

4. escrever um mapa em formato *Postscript*.

O conceito subjacente a toda a aplicação do método DRASTIC é o de unidade cartografada. A unidade cartografada pode ser o aquífero, o sistema aquífero, a formação geológica, etc.

As bases de informação são o ponto de partida essencial para a utilização de processos automáticos. Para a cartografia automática da vulnerabilidade utilizam-se bases de cartografia e bases de dados.

As bases de cartografia contêm a informação espacial. Como bases de cartografia utilizam-se a Carta Geológica de Portugal à escala 1:50 000, a Carta de Sistemas Aquíferos de Portugal (*cf.* INAG (1997) ou http://www.inag.pt/snirh/estudos_proj/cartografia/cartografia.html), a Carta de Solos de Portugal à escala 1:50 000, a Carta de Uso de Solo (*Corine Land Cover*) à escala 1:100 000, e a informação pontual da precipitação anual média ocorrida em Portugal Continental.

As tabelas de relacionamento juntamente com as bases de dados de pontos de água subterrânea constituem as bases de dados necessárias para a elaboração da cartografia automática da vulnerabilidade.

Para a caracterização do parâmetro D, o procedimento automático consiste em utilizar informação armazenada em bases de dados sobre águas subterrâneas. São consultadas tabelas que fornecem informação importante relativamente a este parâmetro

Para a caracterização do parâmetro R, possibilita-se a utilização de dois métodos que permitem, a partir de informação de base, estimar e extrapolar a recarga para outras regiões. Esses dois métodos são: (1) o método de VERMEULEN *et al.* (1993 e 1994); e (2) o método que utiliza a recta de correlação da recarga sobre a precipitação, determinada para casos estudados de formações xistosas e graníticas do Maciço Antigo Português (*cf.* OLIVEIRA *et al.*, 1997a).

Os parâmetros A, I e C são caracterizados a partir de tabelas de relacionamento entre o código da unidade cartografada e o valor do índice a atribuir.

Para a atribuição do índice do parâmetro S, utiliza-se um método que usa como cobertura de base a Carta de Solos de Portugal. O método consiste em utilizar a tabela de relacionamento entre o código de solos e o índice a atribuir.

Para a atribuição do índice do parâmetro T programou-se um método automático que

transforma a informação relativa à altimetria dos ficheiros em formato IGDS no mapa do parâmetro Topografia.

Para os parâmetros D, R, A, S, I e C disponibilizou-se ao INAG, em OLIVEIRA *et al.* (1997a), um processo semi-automático para atribuição do índice a partir da geologia.

Um mapa exemplificativo da aplicação desta metodologia às formações geológicas aflorantes da região de Faro, é apresentado na Fig. 2.9, extraída de OLIVEIRA e LOBO-FERREIRA (1998).

Os resultados do Protocolo de Cooperação estabelecido entre o INAG e o LNEC sobre o tema "Cartografia Automática da Vulnerabilidade de Aquíferos com base na Aplicação do Método DRASTIC" foram publicamente divulgados na sessão do LNEC.DH.GIAS do Worhshop realizado no INAG em Fevereiro de 1997, inserido no ciclo de Sessões Temáticas do INAG/DSRH.

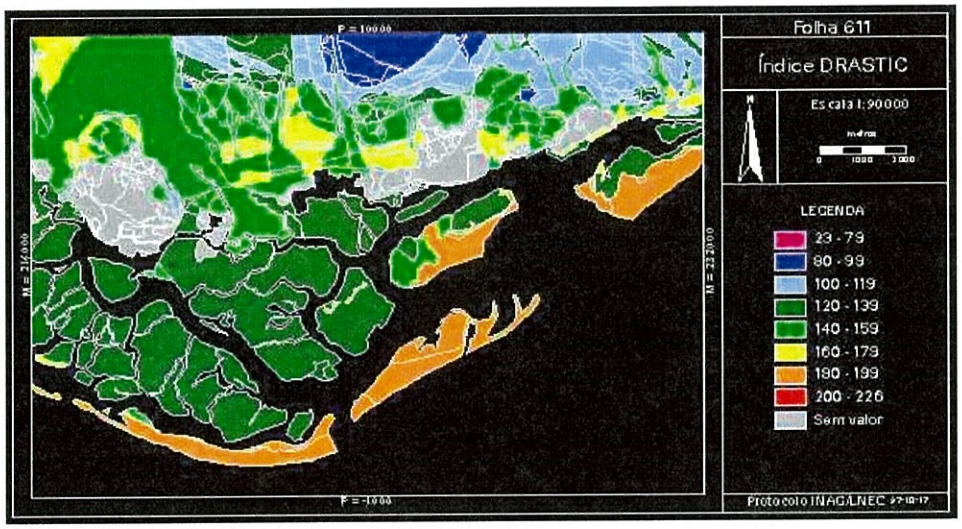


Fig. 2.9 - Mapeamento DRASTIC das formações geológicas aflorantes da região de Faro

(Figura extraída de OLIVEIRA e LOBO-FERREIRA 1998)

5.4 Mapeamento da Vulnerabilidade à Poluição das Águas Subterrâneas da Região de Alqueva, utilizando o Método DRASTIC

5.4.1 Comentários Gerais

LOBO-FERREIRA e OLIVEIRA (1994b) desenvolveram o mapeamento à escala 1:250.000, da vulnerabilidade à poluição das águas subterrâneas da região de Alqueva, tanto para fertilizantes (método DRASTIC), como para pesticidas (método DRASTIC *Pesticidas*). Nesse estudo, apresentaram ainda a caracterização hidrogeológica e a caracterização

hidrogeoquímica dos recursos hídricos subterrâneos da zona abrangida pelo projecto de rega do Alqueva.

5.4.2 Mapeamento DRASTIC

Para o caso do índice DRASTIC, o mapeamento pode ser observado na Fig. 2.10 (*cf.* http://www.dh.lnec.pt/gias/novidades/proj_GIAS_internetP.html, extraída de OLIVEIRA e LOBO-FERREIRA, 1998). O valor do índice calculado varia entre 109 e 182. A classificação do valor de referência médio (para o DRASTIC) da região de Alqueva poderá, assim, ser considerada como "***vulnerabilidade média***".

5.4.3 Mapeamento DRASTIC Pesticidas

Para o caso do índice DRASTIC *Pesticidas*, o mapeamento pode ser observado na Fig. 2.11 (*cf.* http://www.dh.lnec.pt/gias/novidades/proj_GIAS_internetP.html, extraída de OLIVEIRA e LOBO-FERREIRA, 1998). O valor calculado varia entre 129 e 210. A classificação do valor de referência médio (para o DRASTIC *Pesticidas*) da região de Alqueva poderá, também, ser considerada como "***vulnerabilidade média***".

5.5 Desenvolvimento da Componente Recursos Hídricos Subterrâneos dos Plano de Bacia Hidrográfica para o Instituto da Água (INAG) e para as Direcções Regionais do Ambiente (DRAs)

5.5.1 Considerações Gerais

O LNEC.DH.GIAS tem a seu cargo o desenvolvimento da componente "Águas Subterrâneas" dos Planos de Bacia dos rios Tejo e Minho, para o Instituto da Água (INAG), dos rios Sado e Mira para a Direcção Regional do Ambiente do Alentejo (DRA Alentejo) e das ribeiras do Oeste para a Direcção Regional do Ambiente de Lisboa e Vale do Tejo (DRALVT).

A 1ª Fase de ***Caracterização e de Pré-Diagnóstico da Situação de Referência do Plano de Bacia Hidrográfica do Rio Tejo***, terminou em Março de 1999, tendo a componente "Recursos Hídricos Subterrâneos" sido apresentada ao consórcio em LOBO-FERREIRA *et al.* (1999).

No ponto seguinte apresentam-se as metodologias contratuais acordadas entre o INAG, a

DRAAlentejo, a DRALVT e os consórcios, para o desenvolvimento de estudos de avaliação e mapeamento da recarga de aquíferos e da vulnerabilidade à poluição.

5.5.2 Metodologias de Avaliação da Recarga de Aquíferos e da Vulnerabilidade à Poluição solicitadas pelo INAG para os Planos de Bacia

5.5.2.1 Metodologias de Avaliação da Recarga de Aquíferos

Transcreve-se em seguida a metodologia para ***Estimativa das Entradas nos Sistemas Aquíferos*** disponibilizada (em 12-03-1998) na página do INAG na Internet, em http://www.inag.pt e em DSRH (1998). Esta metodologia foi acordada pelo INAG, DRAs e consórcios:

- **Métodos para avaliação da recarga dos sistemas aquíferos ou formações pouco permeáveis:**

(a) Balanço hídrico;

(b) Decomposição do hidrograma de escoamento;

(c) Oscilações de piezometria.

Equação do balanço hídrico (CUSTODIO e LLAMAS, 1983):

$$P + Q_{se} + Q_{te} - ETR - Q_{ss} - Q_{ts} - dS = \varepsilon$$

sendo

P - precipitação;

Q_{se} - caudal superficial de entrada;

Q_{te} - caudal subterrâneo de entrada;

ETR - evapotranspiração real;

Q_{ss} - caudal superficial de saída;

Q_{ts} - caudal subterrâneo de saída;

dS - variação de armazenamento;

ε - erro de balanço.

Delimitação das áreas preferenciais de recarga de cada sistema aquífero ou formações pouco permeáveis, identificadas com potencial hidrogeológico.

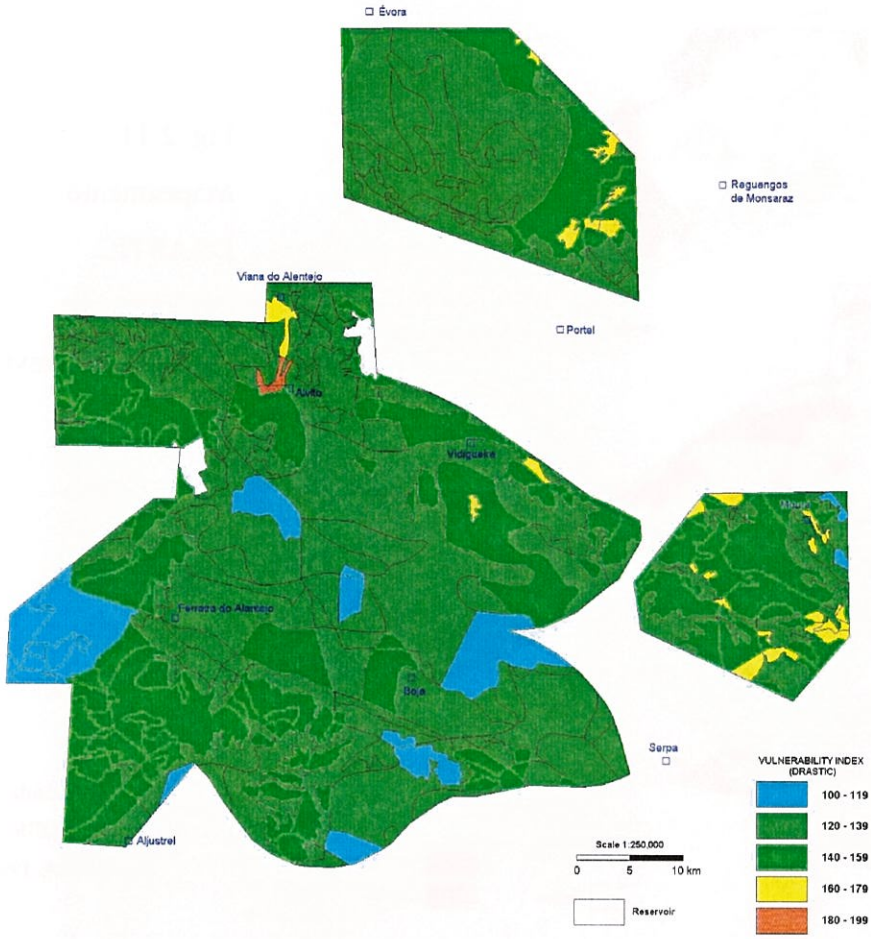


Fig. 2.10 - Mapeamento DRASTIC da região de Alqueva

(Figura extraída de LOBO-FERREIRA e OLIVEIRA, 1994b)

5.5.2.2 Metodologias de Avaliação da Vulnerabilidade à Poluição

Transcreve-se em seguida a metodologia para a ***Determinação da Vulnerabilidade dos Sistemas Aquíferos***, disponibilizada em 12-03-1998 na página do INAG na Internet (cf. http://www.inag.pt). Esta metodologia foi acordada pelo INAG, DRAs e consórcios:

- **Métodos para determinação da vulnerabilidade dos sistemas aquíferos ou das formações pouco permeáveis, identificadas com potencial hidrogeológico:**

(a) Índice DRASTIC (ALLER *et al.*, 1985): *método revisto na secção 3.8*;

(b) Índice GOD (FOSTER, 1987): *método revisto na secção 3.6*;

(c) Índice AVI (VAN STEMPVOORT *et al.*, 1992): *método apresentado na secção 3.7.*

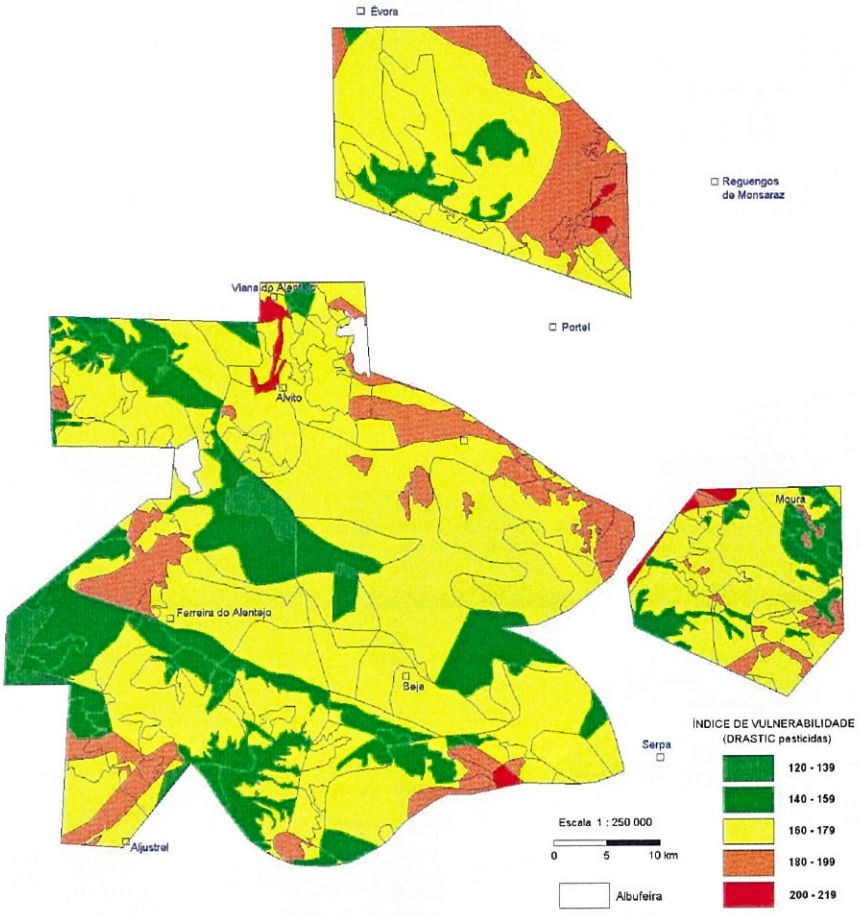


Fig. 2.11 - Mapeamento DRASTIC Pesticidas da região de Alqueva

(Figura extraída de LOBO-FERREIRA e OLIVEIRA, 1994)

5.5.3 Caracterização e Pré-Diagnóstico da Situação de Referência do Plano de Bacia Hidrográfica do Rio Tejo

5.5.3.1 Mapeamento da Recarga de Aquíferos das Bacias Hidrográficas dos Rios Tejo e Sado

O estudo da recarga foi abordado de quatro formas:

1. por pesquisa bibliográfica;
2. por aplicação de um método de decomposição do hidrograma de escoamento total (*cf.* secção 2.2.3) calculado em estações hidrométricas e posterior extrapolação dos resultados obtidos a partir deste método para as formações geológicas do Maciço Antigo (excepto as carsificadas);
3. numa primeira fase, pela aplicação do método de VERMEULEN *et al.* (1993, 1994) às áreas ocupadas pela Orla Mesocenozóica Ocidental, Bacia Terciária do Tejo e formações

carsificadas do Maciço Antigo;

4. numa segunda fase, pela aplicação do método de balanço hídrico sequencial diário, BALSEQ (LOBO-FERREIRA, 1982b).

Na Fig. 2.12 exemplifica-se o estudo desenvolvido no LNEC com a apresentação do mapeamento obtido para a recarga do aquífero denominado *Bacia do Tejo-Sado/Margem Esquerda* (*cf.* INAG/FCL, 1997, Projecto "Definição, Caracterização e Cartografia dos Sistemas Aquíferos de Portugal Continental").

5.5.3.2 Mapeamento da Vulnerabilidade DRASTIC à Poluição das Bacias Hidrográficas dos Rios Tejo e Sado

Na Fig. 2.13 exemplifica-se o estudo desenvolvido com a apresentação do mapeamento obtido para a vulnerabilidade DRASTIC do aquífero denominado *Bacia do Tejo-Sado/Margem Esquerda*.

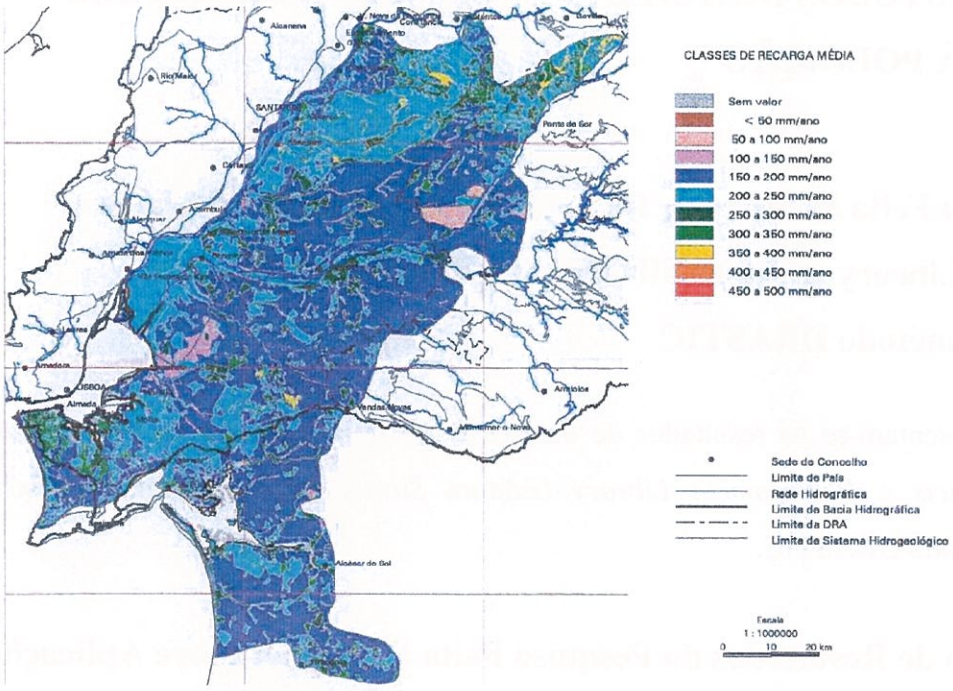


Fig. 2.12 - Recarga do aquífero denominado *Bacia do Tejo-Sado/Margem Esquerda*

(Figura extraída de LOBO-FERREIRA *et al.*, 1999)

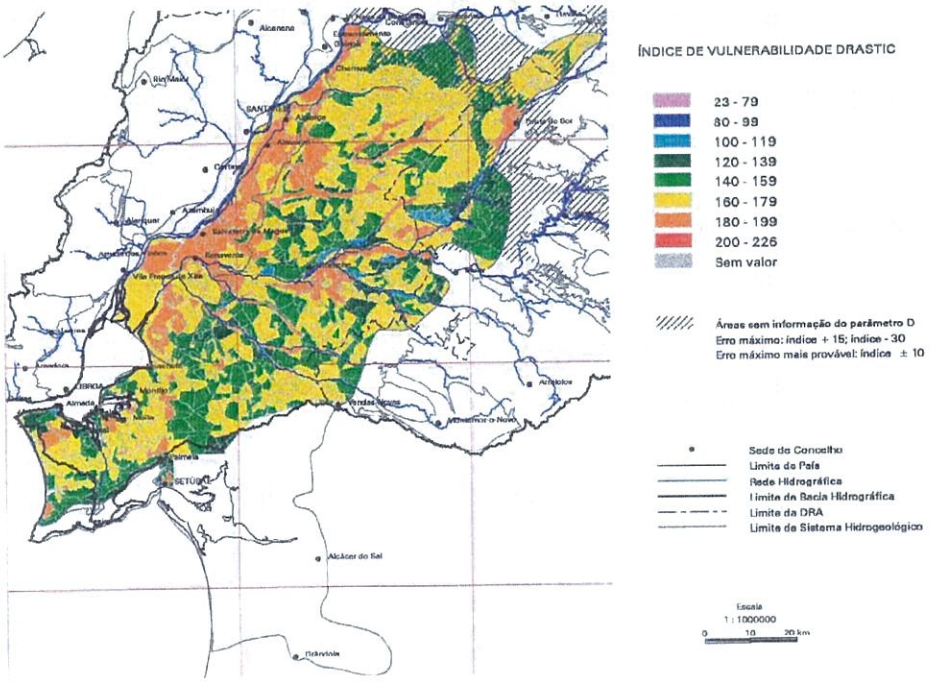


Fig. 2.13 - Vulnerabilidade DRASTIC do aquífero denominado *Bacia do Tejo-Sado/Margem Esquerda*

(Figura extraída de LOBO-FERREIRA *et al.*, 1999)

6. OUTROS ESTUDOS DE AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE DRASTIC À POLUIÇÃO

6.1 Pesquisa Feita às Bases de Dados Water Resources Abstracts e Environment Library (Editora SilverPlatter International) sobre Aplicações do método DRASTIC

No Anexo 1 apresentam-se os resultados de uma pesquisa feita às Bases de Dados *Water Resources Abstracts* e *Environment Library* (Editora *SilverPlatter International*) sobre aplicações do método DRASTIC.

6.2 Selecção de Resultados da Pesquisa Feita à Internet sobre Aplicações do Método DRASTIC (em Março de 1999)

No Anexo 2 apresentam-se os resultados *comentados* de uma pesquisa feita a http://altavista.digital.com/ sobre *"groundwater DRASTIC"* em 17 de Março de 1999.

De entre as vinte primeiras referências *("...AltaVista found 111705 Web pages for you...")* salientam-se as duas seguintes, directamente relacionadas com trabalhos do LNEC.DH.GIAS:

AltaVista found 111705 Web pages for you.

groundwater DRASTIC - List of near matches related to groundwater

DRASTIC provided by RealNames.

1. DRASTIC GROUNDWATER VULNERABILITY MAPPING OF PORTUGAL

nbsp; DRASTIC GROUNDWATER VULNERABILITY MAPPING OF PORTUGAL. in "Groundwater: An Endangered Resource", Proceedings of Theme C (pp. 132-137) of the 27. th.

URL: www-dh.lnec.pt/gias/novidades/DRASTIC_e.html

Last modified 3-Nov-97 - page size 18K - in English (Win-1252)

Apresentado anteriormente... e

17. DRASTIC GFX

Groundwater vulnerability mapping by DRASTIC. Courtesy by Dr. Ing. J.P. Lobo-Ferreira National Laboratory of Civil Engineering Hydraulics Department -...

URL: www.crpht.lu/CIMTEL/LASP/competencies/environ/drastgfx.html

Last modified 5-Dec-97 - page size 895 bytes - in English

Esta referência está disponível na página da Internet do Centre de Recherche Publique Henri Tudor do Luxemburgo. Dessa página salienta-se o seguinte:

Groundwater vulnerability mapping by DRASTIC

Description

Groundwater ressources are scarce, and should be carefully protected against over-exploitation and pollution. Evaluating and mapping of vulnerability to pollution is a usefull tool for groundwater resource management.

*The figure (*apresentada na Fig. 2.14*) illustrates the DRASTIC index method. The map is showing a part of the coastal zone of Portugal. This map has been worked out by the Groundwater Research Group (GIAS) at the National Laboratory for Civil Engineering (LNEC) in Lisbon/Portugal.*

6.3 Opiniões do Autor e de Outros Autores sobre a Aplicação de Métodos de Avaliação da Vulnerabilidade de Aquíferos

6.3.1 Opinião do Autor

6.3.1.1 Considerações Gerais

É **opinião do autor** que a avaliação da vulnerabilidade à poluição de águas subterrâneas

melhora se for desenvolvida com base no cálculo de um índice bem definido, por forma a diminuir a subjectividade inerente ao processo de classificação.

Para os utilizadores do método DRASTIC é importante a vantagem de poderem contar com a experiência também disponível e publicada por autores de outros países (e.g. EUA, Canadá, África do Sul, Itália e Suécia). Salientam-se as seguintes páginas disponíveis na Internet, que descrevem estudos onde se aplicou o método "DRASTIC", resultados de uma pesquisa feita em 17 de Março de 1999 a http://altavista.digital.com/:

- http://pasture.ecn.purdue.edu/~frankenb/watershedmap.html: COPPER (1996) apresenta o mapa de vulnerabilidade do estado de Indiana, EUA
- http://ncgia.ucsb.edu/conf/SANTA_FE_CDROM/sf_papers/navulur_kumar/my_paper.html.: NAVALUR e ENGEL (1997) comparam esse mapeamento DRASTIC com a qualidade das águas subterrâneas do estado de Indiana, EUA
- http://www.ccwr.ac.za/~lynch2/drastic.html: LYNCH *et al.* (1993) apresentam o mapeamento da vulnerabilidade DRASTIC da África do Sul
- http://wtrwww.env.gov.bc.ca/wat/gws/gwdocs/gweddocs/mapping1.html: PITEAU e TURNER (1993) apresentam o mapeamento da vulnerabilidade DRASTIC da província canadiana de British Columbia

Com base na experiência anteriormente apresentada neste capítulo, LOBO-FERREIRA (1998) recomendou a utilização do método do DRASTIC, para obtenção do mapeamento da vulnerabilidade à poluição de águas subterrâneas, incluindo para estudos de impacto ambiental de perímetros agrícolas. Assim, **na opinião do autor**, o índice DRASTIC apresenta as características de robustez e simplicidade requeridas aos mapeamentos da vulnerabilidade à poluição de águas subterrâneas de Portugal.

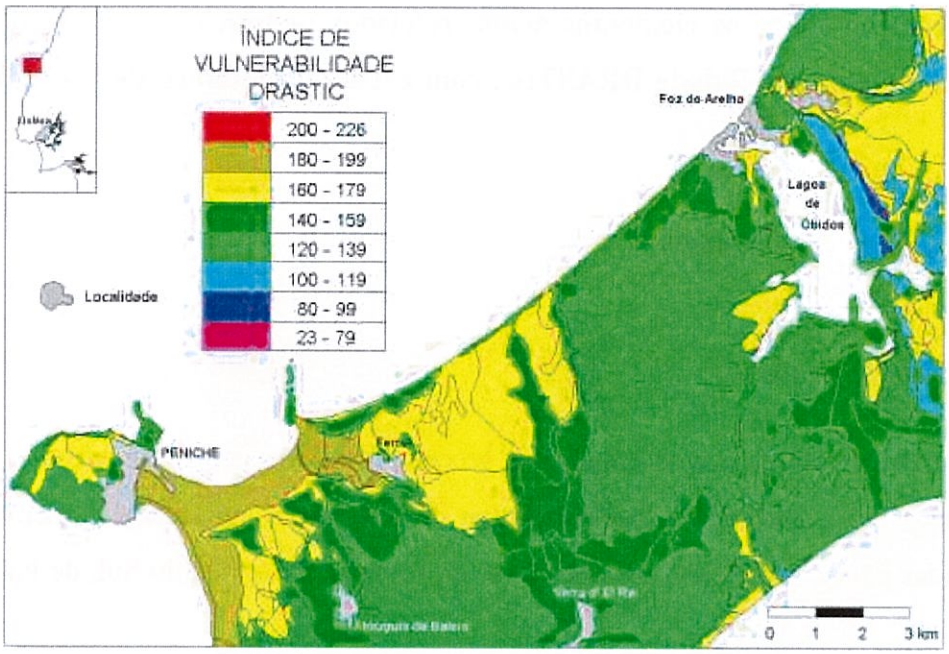


Fig. 2.14 - Vulnerabilidade DRASTIC da zona costeira de Portugal Continental

(figura extraída de LOBO-FERREIRA et al. (1995d) e disponível na página http://www.crpht.lu/CIMTEL/LASP/competencies/environ/drastgfx.html do Centre de Recherche Publique Henri Tudor do Luxemburgo)

6.3.1.2 Considerações Específicas

Salienta-se, no entanto, que a quantidade e a qualidade da informação disponível para a caracterização de cada um dos sete parâmetros do índice DRASTIC é variável e a qualidade dos resultados obtidos depende muito dessa informação.

Assim, e por exemplo para o estudo da zona costeira de Portugal Continental (*cf.* Fig. 2.14), **a cartografia final do índice de vulnerabilidade DRASTIC ganharia mais consistência se os seguintes factores condicionantes fossem ultrapassados:**

1. utilização da cartografia geológica à escala 1:200 000 para a caracterização dos parâmetros dependentes desta cartografia (C, I e A) na região do Alentejo compreendida entre Melides e Carrapateira, e no Algarve, a leste de Tavira; o ideal seria, à semelhança da restante região costeira, a disponibilidade de cartografia à escala 1:50 000;
2. inferência do tipo de solo a partir da Carta de Solos 1:1 000 000 e da cartografia geológica à escala 1:50 000 para a caracterização do tipo de solo na região a norte de Lisboa até Espinho (excluindo **Peniche**, *cf.* **Fig. 2.14**); a situação ideal seria igualmente a disponibilidade de cartografia de solos à escala 1:50 000;
3. finalmente, a caracterização da profundidade do topo do aquífero cujo valor é muito variável tanto no espaço como no tempo; o ideal seria ter mais registos de níveis tanto no espaço como no tempo, de forma a se poderem utilizar valores médios ou máximos, o que permitiria uma extrapolação mais segura dos valores.

Uma melhor informação sobre os elementos acima referidos poderá conduzir a uma alteração do índice de vulnerabilidade DRASTIC, com eventual mudança de classe do índice final.

6.3.2 Opiniões de outros Autores

6.3.2.1 Considerações Gerais

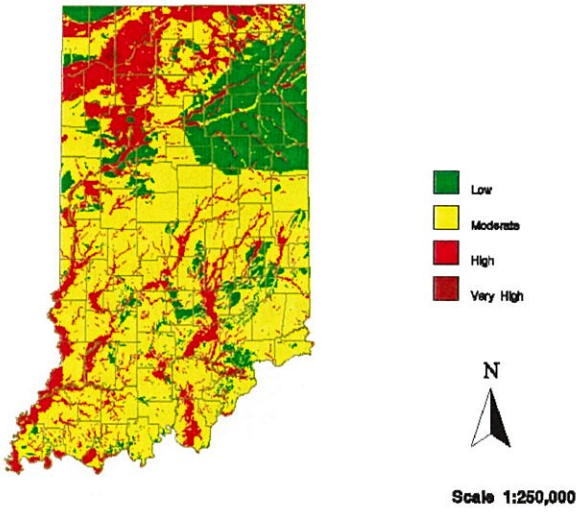
Analisada a bibliografia recolhida e apresentada nas secções anteriores e nos Anexos 1 e 2, apresentam-se nesta secção comentários positivos e/ou de reservas à aplicação do método DRASTIC, publicadas por autores dos Estados Unidos, do Canadá, da África do Sul, de Itália e da Suécia.

6.3.2.2 Estados Unidos

1. Comentários de Kuma C.S. Navalur e Bernard A. Engel *in* **Predicting Spacial Distributions of Vulnerability of Indiana State Aquifer Systems to Nitrate Leaching using GIS:**

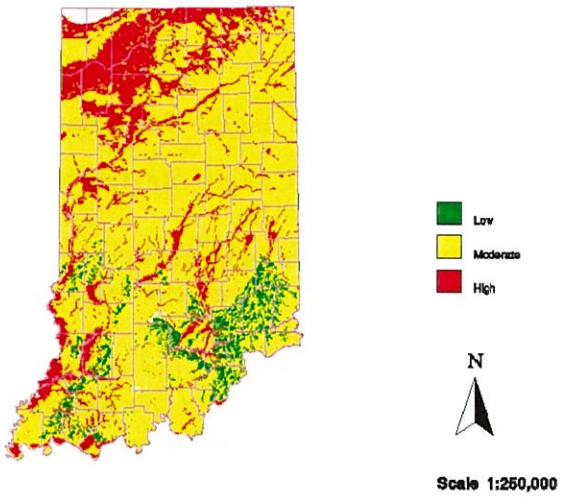
- *Preliminary screening analysis to evaluate the vulnerability of groundwater systems of Indiana to nitrate pollution was carried out using a modified DRASTIC and SEEPAGE analysis at 1:250 000 scale* (*cf.* Fig. 2.15).
- *The comparison showed a correlation coefficient of 0.67 and showed that these regional scale analyses show a great deal of potential as screening tools for policy decision making in groundwater management.*
- *Validation of the Accuracy of the Regional Scale Vulnerability Maps: The modified DRASTIC and SEEPAGE results were compared with nitrate detections in 380 well sites sampled across Indiana.*
- ***The results from the conventional and modified DRASTIC and SEEPAGE approaches were compared with the database containing observed nitrate detections in wells. The conventional DRASTIC and SEEPAGE models predicted 80% of the high and very high vulnerable areas correctly. There was a 20% increase in accuracy in predicting low vulnerability areas using the modified DRASTIC technique.***
- ***The results from conventional and modified DRASTIC and SEEPAGE analyses were compared with the nitrate detections in well water quality samples across the states. The results indicated that the models performed well in predicting the sites with high and very high nitrate detections.***
- ***The modified DRASTIC and SEEPAGE analysis show a great deal of potential as screening tools for policy decision making in groundwater management.***

- ***These analyses should not be used to replace detailed studies but should be applied to screen areas of high and very high vulnerability that a site-specialist should concentrate on.*** *These analyses can be further modified by including additional data showing the excess amount of nitrate applied, crop rotations, and livestock nutrient value applied to farms. It is anticipated that this will improve the accuracy of the vulnerability estimates.*



Groundwater Vulnerability Map to Nitrate Pollution Using Modified DRASTIC Technique

(Figura extraída de http://pasture.ecn.purdue.edu/~frankenb/watershedmap.html)



Groundwater Vulnerability Map to Nitrate Pollution Using Modified SEEPAGE Technique

(Figura extraída de http://pasture.ecn.purdue.edu/~frankenb/watershedmap.html)

Fig. 2.15 - Mapeamento da vulnerabilidade à poluição DRASTIC e SEEPAGE das águas subterrâneas do estado de Indiana, EUA

2. Resultados e comentários ao estudo de Cooper *et al.* intitulado **Groundwater vulnerability evaluation to pesticide and nitrate pollution on a regional scale using GIS**:

- Em http://soils/ecn.purdue.edu/~aggrass/GROUNDWATER/newgifs/dscale.gif Cooper *et al.* apresentam um notável trabalho investigação aplicada onde analisam o efeito de escala na obtenção de mapas DRASTIC, tanto para a escala regional do estado de Indiana (*cf.* Fig. 2.15) que com uma área de 94 328 km^2 tem uma dimensão praticamente idêntica à de Portugal (92 345 km^2) como para a escala concelhia. Relacionam também a ocorrência de nitratos e pesticidas nas águas subterrâneas com as classes obtidas pelo mapeamento DRASTIC. Na Fig. 2.16 apresentam-se os resultados obtidos, disponíveis em http://soils/ecn.purdue.edu/~aggrass/GROUNDWATER/tip.gif, para o condado de Tippecanoe.
- Comentários adicionais a este tema são apresentados em NAVALUR e ENGEL (1997), *in* http://ncgia.ucsb.edu/conf/SANTA_FE_CDROM/sf_papers/navulur_kumar/my_paper.htm:

The USEPA (1992) analyzed the results of the National Survey of Pesticides in Drinking Water Wells data and the qualitative DRASTIC scores developed by ALLER et al. (1987) at a

1:2,000,000 scale. *County level DRASTIC scores (an aggregated score for each county) and subscores were computed and 90 counties were selected for analysis with nitrate data from wells sampled in the study.* ***The results showed that DRASTIC performed very poorly for the selected counties*** *(cf.* Fig. 2.16*).* ***Hence for implementation of groundwater quality management plans at a regional scale more detailed vulnerability map is needed****. The proposed study will use more detailed data at the 1:250,000 scale for estimating DRASTIC indices and additional data to improve vulnerability estimates.*

3. Comentários de James W. Merchant *in* **GIS-Based Groundwater Pollution Hazard Assessment: A Critical Review of the DRASTIC Model**:

- *While generalized soils association data are commonly obtainable, and have frequently been used in large-area studies, the methods by which to assign appropriate ratings and weightings to such data are far from clear. Moreover, when soils association data are employed in DRASTIC, the effects on model execution are uncertain. It is noteworthy however, that soils data are some of the very best data one normally can obtain for implementing the DRASTIC model.*

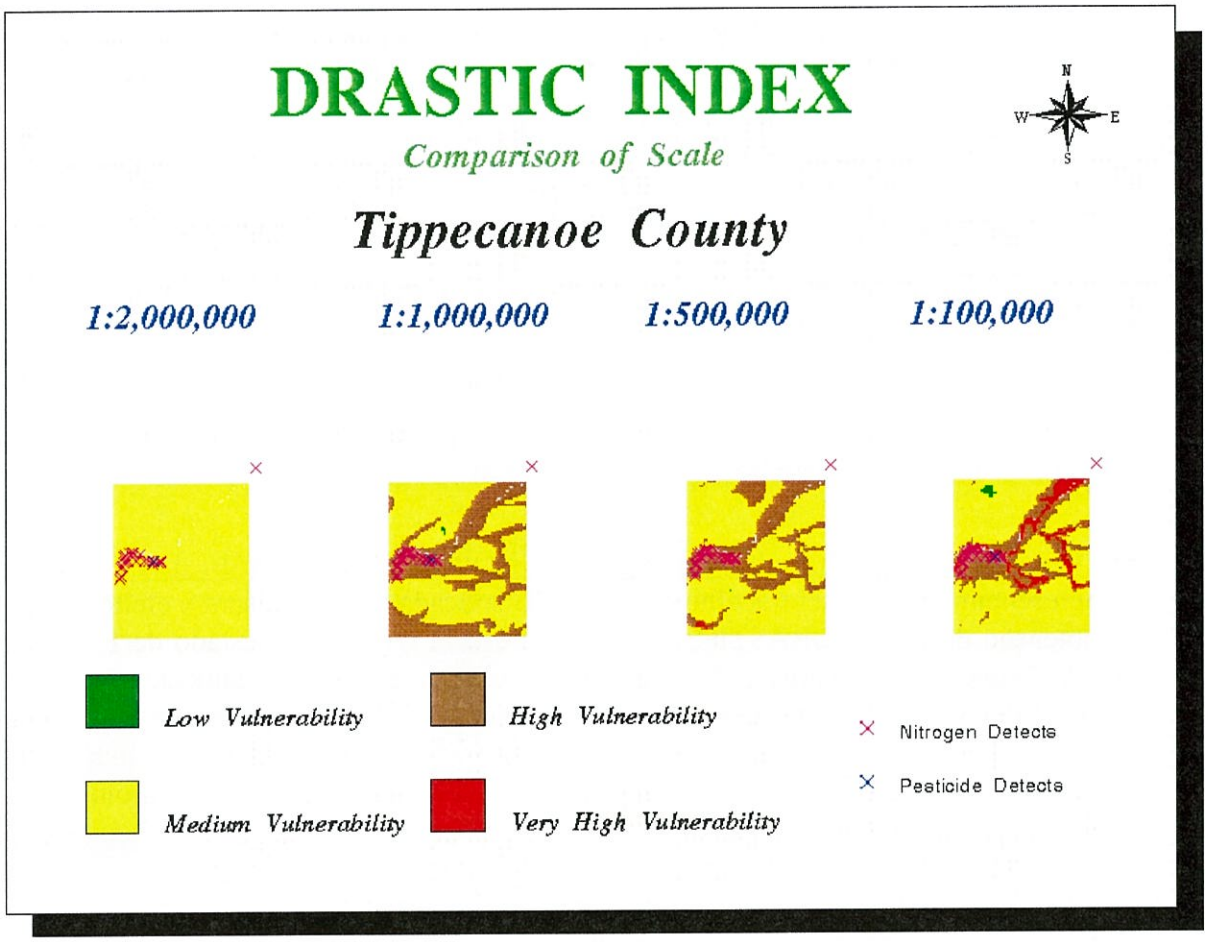


Fig. 2.16 - Vulnerabilidade DRASTIC do condado de Tippecanoe, EUA, calculada a várias escalas (**figura extraída de COOPER *et al.*, disponível em** http://soils/ecn.purdue.edu/~aggrass/GROUNDWATER/tip.gif)

- *Some authors writing on groundwater vulnerability assessment warn that source data may be of questionable reliability and effects on models hard to predict.*
- *Moreover, few (authors) acknowledge, or express concerns about, the possible impacts of database quality or scaling issues on the outcome of groundwater vulnerability modelling.*
- *The DRASTIC model is formulated as a linear combination equation. Although widely used, such models have certain limitations that are especially apparent when they are implemented in GIS. HOPKINS (1994, in MERCHANT, 1994), for example, cautions that linear combination models are inherently prone to uncertainties about the possible interdependence of factors.*
- *Newcomer and SZAIJGIN (1984, in MERCHANT, 1994) discuss the potential for error propagation in overlay analysis. They concluded that the accuracy of composite map products, such as DRASTIC, is generally less than the accuracy of the least accurate map layer used in the analysis.*
- *Nonetheless, it should be recognised that research has demonstrated that even small changes in weightings can result in large differences in the outcome of modelling, and that there are important, though ill-defined, relationships between weighting factors, the spatial distribution of input maps, and model results.*
- ***When one considers how widely DRASTIC has been used, it is rather surprising to observe that few attempts have been made to determine how well the model and its kin perform, to guide users in proper interpretation of the model results.***
- *KALINSKY et al. (1994, in MERCHANT, 1994) has two important implications. First, it seems to indicate that* ***DRASTIC is relatively robust*** *in the sense that, despite likely errors in data and compromises discussed above, the model still performed well. Second, there is a suggestion in the study results that the hypnotises posed above is supported.* ***Specifically, the postulated relationship between DRASTIC scores and vadose zone time-of-travel appears to lend weight to the observation that just a few of the seven factors (e.g., characteristics of the soil media and depth-to-water) seem to exert an extraordinary influence on index computation in current implementation of DRASTIC.***
- ***The usual evidence for performances been "visual validation"; that is, a judgement by experts that the maps resulting from groundwater vulnerability modelling look reasonable. This type of assessment should not be discounted. However, additional, more quantitative research needs to be undertaken.***

No Capítulo Nono desenvolver-se-ão algumas das sugestões apresentadas por MERCHANT (1994) para prosseguimento da investigação sobre vulnerabilidade de aquíferos.

6.3.2.3 Canadá

1. Comentários de Denis Isabel, Pierre Gélinas e François Aubre *in* **Cartographie de la Vulnerabilité des Eaux Souterraines au Quebéc**:

- *La cartographie de la vulnerabilité des eaux souterraines est une méthodologie de plus répandue et répont à un besoin des organismes responsables de l´organisation du*

territoire. ***Au Quebéc, des traveaux de cartographie de la vulnerabilité sont déjà en cours au Ministère de l´Environnement du Quebéc et sont basés sur l´utilisation de la méthode DRASTIC.***

- *Cette méthode peut être adaptée et améliorée sur deux aspects. Premièrement, les paramètres, les cotes et les pondérations peuvent être adaptés à l´hydrogéologie québécoise; et deuxiémement, la méthode de répresentation cartographique peut être enrichie pour rendre plus de détails au moyen de techniques graphiques numériques.*

2. Comentários de Piteau Associates Engineering Lda e de Turner Groundwater Consultants *in* **Groundwater mapping and assessment in British Columbia**:

- ***Groundwater Vulnerability Maps:*** *Examples of groundwater vulnerability mapping include a 1:63,360 scale depiction of pollution potential index for Portage Country in Ohio (ANGLE, 1990, in PITEAU e TURNER, 1993).* ***The pollution potential index is formulated using the DRASTIC method*** *which accounts for depth to the water table, net recharge, aquifer media, soil media, topography/slope, impact of vadose- zone media, and hydraulic conductivity.*
- ***The following recommendations are set out in decreasing priority:***

a) A minimum set of data elements (MSDE) be established for the collection and sharing of groundwater information. The MSDE ... will be comprised of core groundwater information which in all cases should consist of the minimum amount of information collected or communicated. All water-well records on-file with the Groundwater Division should be checked to ensure they include the MSDE. ***Of utmost importance*** *in this regard, water-well records should be updated to include location coordinates and elevations to facilitate spatial analysis and incorporation into computerized Geographic Information Systems (GIS). Existing groundwater chemistry information will be updated to conform to the MSDE.*

b) Access to groundwater information be improved through establishment of a central repository with data accessible by computer modem. In this respect, consideration should be given to publishing a groundwater information source book.

c) The Provincial Government set standards for groundwater mapping and data collection with support from the Federal Government. Local governments accept a significant role in the management and protection of groundwater resources and carry out much of the required groundwater data collection.

d) Implement a well-tagging program in selected areas of British Columbia. By including the appropriate unique well tag number with each measurement, sample, or groundwater observation, data can be readily stored, retrieved, and integrated with other computer systems.

e) Implement a mandatory water well drillers' certification program to ***assure the quality of groundwater-related data collected by the drillers.***

3. Michelle Fortin, Geoffrey Edwards e Keith P.B. Thomson *in* **The role of error propagation for integrating multisource data within spatial models. The case of the**

DRASTIC groundwater vulnerability model:

No Capítulo Nono desenvolver-se-ão algumas das sugestões apresentadas por FORTIN *et al.* (1997, *in* www.crg.ulaval.ca/fr/Evenements/symposiu.../79-Fortin.html) para prosseguimento da investigação sobre vulnerabilidade de aquíferos, nomeadamente quanto a:

- *... **analytical error propagation model** has been used to characterise the spatial distribution of error for the DRASTIC groundwater vulnerability model. The model combines three distinct error submodels, one for interpolated variables a second for **fuzzy** polygon boundaries and a third for classified remote sensing data.*
- *The lack of knowledge of the spatial autocorrelation structure of the final products constitutes the most severe limitation to the model. **The model provides nonetheless a useful guide to the spatial distribution of reliability in a decision-making context.***

6.3.2.4 África do Sul

Comentários de SD Lynch, AG Reynders e RE Schulze *in* **Preparing input data for a National-Scale Groundwater Vulnerability Map of Southern Africa:**

- *In compiling a national-scale groundwater vulnerability map of Southern Africa, it was decided to use the widely known DRASTIC methodology (cf.* Fig. 2.17)...
- *This methodology is well suited to gridded information sets of factors influencing groundwater vulnerability. The fact that the major strength of a grid cell-based model lies in its analytical capabilities, makes the ARC/INFO Geographic Information System (GIS) the ideal choice for manipulation and displaying the data surrounding the DRASTIC model.*
- *The National Research Council (NRC) have defined groundwater vulnerability to contamination as: **"The tendency or likelihood for contaminants to reach a specified position in the groundwater system after introduction at some location above the uppermost aquifer"** (NRC, 1993, pg.1).*
- ***Although several vulnerability techniques have been developed world-wide, the 7 criteria considered in DRASTIC generally embody the most significant factors controlling vulnerability to contamination.***
- ***DRASTIC does have some limitations, however, and these are contained within the vulnerability map of Southern Africa.** For example, it does not consider the impact of human activity on groundwater, nor does it allow for natural or man-induced water quality problems (being intrinsically a vulnerability, as opposed to a risk assessment, technique). **Some physical parameters neglected by the current method and which have a strong influence on groundwater pollution include fracturing and faulting**; the significant effects of precipitation duration and intensity; soil reactivity; differences in specific contaminant mobility; and anisotropy and heterogeneity of the soil, the vadose zone, and aquifer hydraulic conductivity. Dilution is not considered, which could be a significant factor in the limited storativity, hard-rock conditions prevalent over much of Southern Africa.*

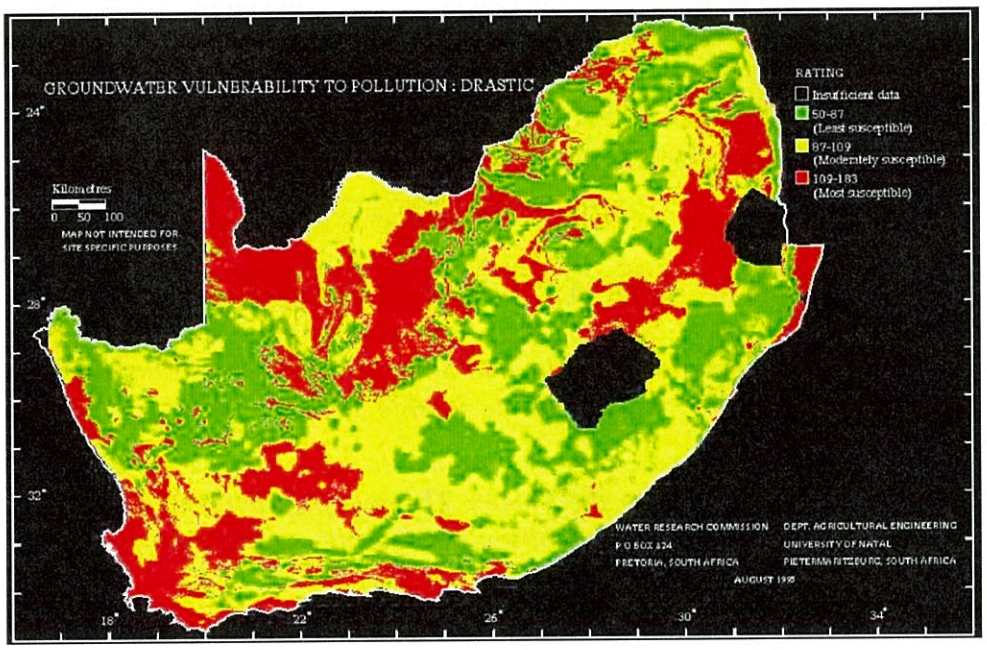


Fig. 2.17 - Mapeamento da vulnerabilidade à poluição DRASTIC das águas subterrâneas do Sul de África

(Figura extraída de http://www.ccwr.ac.za/~lynch2/drastic.html

- *It must be borne in mind, however, that no attempt to validate the draft vulnerability map of Southern Africa has taken place and that* ***further research will be necessary before a tool useful to planners and decision-makers will be available****.*
- *DISCUSSION AND CONCLUSIONS: Several techniques have been developed to assess the potential for groundwater contamination on a regional scale. Use of simulation models and various numerical rating techniques have been proposed in the international literature. Essentially, the type of technique employed will depend upon the availability of data and the ultimate use to which the vulnerability assessment will be put. With the arrival of GIS, the inventory, archival, retrieval and display of spatial data and the link to numerical rating systems and simulation models have become a reality.* ***For the purpose of preparing the first national-scale groundwater vulnerability map of Southern Africa, the DRASTIC methodology*** *developed by the US EPA was selected. The digital images or overlays used to produce the groundwater vulnerability map are housed on the Computing Centre for Water Research (CCWR) mainframe computer that is networked to several local and international computer networks. The data conversion models in ARC/INFO make it possible to convert from a number of different formats into the raster format required by GRID and this allows users to manipulate and modify the DRASTIC equation within minutes. For example, a depth to groundwater image (SEED, 1993, in LYNCH et al., 1994) was produced and incorporated into the groundwater vulnerability map by importing the image into GRID and recalculating the DRASTIC values. It is, therefore, possible to update the map whenever new data become available which will certainly be the case when the National Hydrogeological map becomes available in 1994. The groundwater fraternity of Southern Africa must take cognisance that 46 States in the USA have regulations requiring drillers or homeowners to file well completion reports for domestic wells (GANLEY, 1989, in LYNCH et al., 1994). It is, therefore, of paramount importance that the NGDB be populated at an accelerated rate and that a list be made available of groundwater-related data sets and the organisations that have captured or are in the process of capturing hydrogeological data.*

6.3.2.5 Itália

1. Comentários de La RUSSI SOFTWARE s.n.c. *in* **Un programma per il calcolo del Drastic Index relativo a unità territoriali e a modelli reticolari denominato DRASTIC-O**:

- ***Tra le varie metodologie applicabili per la determinazione della vulnerabilità degli acquiferi il modello DRASTIC spicca per semplicità d'uso e validità dei risultati ottenibili.*** *Esso trova largo impiego anche negli Studi di Impatto Ambientale come strumento idoneo per le stime relative alla componente "Acque sotterranee".*
- *Elaborato verso la metà degli anni ottanta da un gruppo di ricercatori americani per conto dell'EPA (Environmental Protection Agency), il modello DRASTIC è attualmente diffuso in tutto il mondo.*

2. Comentários da aplicação do método DRATIC à bacia hidrográfica do rio Pó *in* **Cartografia delle Vulnerabilità degli Acquiferi: Dagli Studi Conoscitivi all´applicazione Normativa**:

- *È opportuno sottolineare che la vulnerabilitá è stata riferita, con I metodi DRASTIC e SINTACS.*
- *La mappatura classata dell´indice DRASTIC con la linea di pesi normale, evidenzia, sulla gran parte dell'areale di studio (circa 83%), una situazione di vulnerabilità medio alta (50-80%) delle acque sotteranee.*
- *La distribuzione della vulnerabilità agricola non cambia, come andamento, rispetto a quella calcolata secondo lo schema normale.*

3. Comentários de CORNIELLO *et al.* (1997) *in* **Comparison Between Parametric Methods To Evaluate Aquifer Pollution Vulnerability Using A Gis. An example in the "Piana Campana" (southern Italy).**

Na Fig. 2.18 apresenta-se a comparação de mapeamentos de vulnerabilidade à poluição por aplicação dos métodos DRASTIC, SINTACS, AVI e GOD à região de Piana Campana, no sul de Itália, por CORNIELLO *et al.* (1997).

Os autores concluiram o seguinte:

The comparison between AVI, GOD, DRASTIC and SINTACS, in the test area, allows to do the following considerations:

a. *All the methods, excluding GOD, point out the same areas as areas of "high vulnerability", also if with differences in the extension and in the degree of vulnerability;*
b. *SINTACS seems to be the method that better can describe complex hydrogeological settings at medium-large scale;*

c. *Between the methods that use few parameters, AVI produces results comparable with the ones obtained with more complex methods, when working at regional scale.*

This paper represents a first contribution to the problem of comparison between vulnerability methods (CIVITA and DE REGIBUS, 1995). More detailed analyses and a wider range of test areas are object of further research done by the authors.

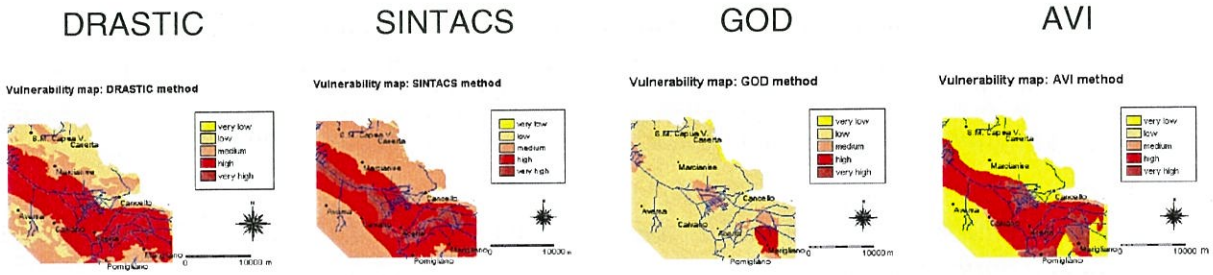


Fig. 2.18 - Comparação de mapeamentos de vulnerabilidade à poluição DRASTIC, SINTACS, AVI e GOD (**Figura extraída de CORNIELLO *et al.*, 1997**)

6.3.2.6 Suécia

Comentários de Lars Rosen *in* **A Study of the DRASTIC Methodology with Emphasis on Swedish Conditions**:

- *A comparison of the DRASTIC parameters with parameters found to determine the effects on ground-water quality in surficial aquifers in south-western Sweden from acid decomposition showed a good agreement between these two parameter sets.*
- *The study thus indicated that the selection of parameters is relevant for general ground-water vulnerability assessment in Sweden.*
- *Assuming that acid deposition fulfils the assumptions of DRASTIC, regarding the behaviour of the pollutants,* ***this study indicates that the main part of DRASTIC parameters are of significant importance to the pollution potential of groundwater in south-western Sweden****.*
- ***The concept of hydrogeologic setting in DRASTIC and the possibility to trace results backwards in the system is excellent****, but the qualitative weight functions result in a simplistic index of unclear meaning that is less useful and less distinctive than desired.*
- ***The system tends to overestimate the vulnerability of porous media aquifers compared to fractured media.***
- *The rating tables need to be revised so that more weight is given to specific surface and effective porosity, and less to hydraulic conductivity.*

- *The applicability of the results would be enhanced and the risk of misuse reduced if the results were more clearly directed towards scientifically defined factors, e.g. sorption capacity, travel time, and dilution.*
- ***Functional methodologies for planning purposes in groundwater protection and management are of primary importance, and it is hoped that systems like DRASTIC are continuously studied and improved as the demands increase for more accurate planning tools.***

7. SÍNTESE CONCLUSIVA SOBRE A APLICAÇÃO DE MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE À POLUIÇÃO DE AQUÍFEROS

Foram analisados neste Capítulo Segundo diversos métodos e apresentados resultados de estudos de avaliação da vulnerabilidade à poluição de aquíferos.

Em Portugal, foram já aplicados alguns dos métodos anteriormente apresentados, observando-se um maior número de aplicações dos métodos *clássicos* e do método DRASTIC.

É agora importante o desenvolvimento de estudos de calibração dos métodos de avaliação da vulnerabilidade à poluição de aquíferos, nomeadamente do método DRASTIC, para permitir a comparação dos seus **resultados quantitativos** (*i.e.* em termos de valor do índice) e **qualificativos** (*i.e.* qualificando as classes de vulnerabilidade em termos de "*muito elevada*", "*elevada*", "*média*", "*baixa*" e/ou "*muito baixa*") com os resultados de análises da qualidade de água dos sistemas aquíferos de Portugal, *e.g.* do Baixo Tejo e Sado recentemente monitorizados pelo LNEC para o Instituto da Água, no âmbito dos estudos desenvolvidos para o **Plano de Bacia do rio Tejo**.

É também importante a comparação desses **resultados quantitativos** e **qualificativos** com os obtidos por outras técnicas das quais se salienta *a Geofísica na Detecção e Parametrização de Aquíferos*. ANDRADE AFONSO *et al.* (1998) referem as potencialidades da geofísica:

A prospecção geofísica desempenha um papel importante na detecção, quantificação, e também na determinação de parâmetros hidrogeofísicos que permitem, a partir dos valores obtidos por métodos geofísicos, uma aproximação aos valores de parâmetros hidrológicos como a condutividade hidráulica, a porosidade, a transmissividade, etc. Permitem ainda, a delimitação de áreas de maior ou menor ***vulnerabilidade à poluição****, pela detecção de zonas de fractura e/ou pela localização e quantificação da espessura das camadas de argila e bem assim pelas*

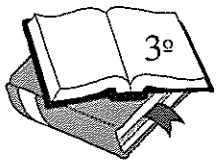
zonas de descontinuidade eventualmente existentes naquelas.

Fundamentando essas afirmações GONÇALVES e ANDRADE AFONSO (1998) no seu estudo "*Geofísica na Protecção dos Recursos Hídricos. Mapeamento de Zonas de Risco no Vale do Tejo-Sado Recorrendo a Prospecção Geoeléctrica*" desenvolvem uma análise das zonas mais ou menos permeáveis no Vale do Tejo interpretando levantamentos geoeléctricos. Na sua comunicação os autores comparam resultados de prospecção de aquíferos e de qualidade da água.

Será interessante comparar os resultados apresentados por esses autores, nomeadamente as figuras da superfície representativa do "*parâmetro protecção*" com as figuras apresentadas pelo autor ao 4º Congresso da Água (*cf.* LOBO-FERREIRA, 1998) na comunicação "*Vulnerabilidade à poluição de águas subterrâneas: Fundamentos e conceitos para uma melhor gestão e protecção dos aquíferos de Portugal*".

No Capítulo Nono desenvolve-se este tema na perspectiva da continuação, aprofundamento, calibração e validação de métodos de avaliação da ***vulnerabilidade à poluição*** de aquíferos disponíveis em Portugal.

CAPÍTULO TERCEIRO



MONITORIZAÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Resumo do Capítulo

Neste capítulo apresentam-se estudos de investigação programada, aplicada ou por contrato, recentemente desenvolvidos ou em desenvolvimento a nível nacional, comunitário ou internacional, sobre monitorização de águas subterrâneas. A base para elaboração deste capítulo inseriu-se nos estudos subjacentes aos Projectos de Investigação Comunitária, para a DGXII (Investigação) intitulado *Requirements for Density, Sampling Frequency, Data Storage and Estimate Costs of Groundwater Quantity Monitoring*, apresentados em LOBO-FERREIRA *et al.* (1995) e para a DGXI (Ambiente) intitulado *Evaluation of the Costs of*

Groundwater Inspection in the Member States, apresentados em LOBO-FERREIRA *et al.* (1996).

Desenvolvem-se neste Capítulo Terceiro os objectivos da monitorização quantitativa das águas subterrâneas, os procedimentos para caracterização da qualidade das águas subterrâneas, os factores determinantes na qualidade das águas subterrâneas, os mecanismos de contaminação das águas subterrâneas, os objectivos da monitorização qualitativa de águas subterrâneas e a caracterização da situação nacional em relação à monitorização quantitativa e qualitativa das águas subterrâneas.

MONITORIZAÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

1. INTRODUÇÃO

Neste Capítulo Terceiro apresentam-se os conceitos de base que se julgam necessários a uma boa compreensão da problemática da monitorização quantitativa e qualitativa de águas subterrâneas.

A base para elaboração deste capítulo inseriu-se nos estudos subjacentes aos Projectos de Investigação Comunitária, para a DGXII (Investigação) intitulado *Requirements for Density, Sampling Frequency, Data Storage and Estimate Costs of Groundwater Quantity Monitoring*, apresentados em LOBO-FERREIRA *et al.* (1995) e para a DGXI (Ambiente) intitulado *Evaluation of the Costs of Groundwater Inspection in the Member States*, apresentados em LOBO-FERREIRA *et al.* (1996).

Inicia-se o capítulo com uma breve apresentação do enquadramento comunitário do tema, nomeadamente relacionando-o com o *Programa de Acção para a Protecção e a Gestão Integrada das Águas Subterrâneas*, e com a nova *Lei-Quadro da Água*, documentos aprovados pelo Conselho da União Europeia, respectivamente em 1996 e em 1998.

Apresentam-se em seguida os objectivos da monitorização quantitativa das águas subterrâneas, os procedimentos para caracterização da qualidade das águas subterrâneas, os factores determinantes na qualidade das águas subterrâneas, os mecanismos de contaminação das águas subterrâneas, os objectivos da monitorização qualitativa de águas subterrâneas e a caracterização da situação nacional em relação à monitorização quantitativa e qualitativa das águas subterrâneas.

2. ENQUADRAMENTO COMUNITÁRIO

Em 10 de Julho de 1996, a Comissão Europeia adoptou o *Programa de Acção para a Protecção e a Gestão Integrada das Águas Subterrâneas* (*Action Programme for Integrated Groundwater Protection and Management*, GAP). O GAP pretende dar um importante passo para fortalecer a política da água na União Europeia. Como principal linha de força o GAP, obriga cada Estado-Membro a programar acções nacionais, de acordo com as acções acordadas e aprovadas em conjunto, e a implementá-las até ao ano 2000, de forma ajustada às situações particulares das diversas regiões da União.

Os programas nacionais deverão incluir a identificação e o mapeamento dos recursos hídricos subterrâneos, e a identificação das fontes de poluição urbana, industrial e agrícola.

O GAP enfatiza a importância da protecção das águas subterrâneas, incluindo a necessidade da designação de zonas onde as águas subterrâneas são particularmente importantes ou estão particularmente ameaçadas. **Recomenda o incremento da monitorização quantitativa e qualitativa das águas subterrâneas.**

A Nova Directiva Quadro da Água, aprovada em 1998 e que incorpora em si as atribuições do *Programa de Acção para a Protecção e a Gestão Integrada das Águas Subterrâneas*, tece as seguintes considerações sobre requisitos de monitorização:

A gestão da água não é possível sem a existência de dados fiáveis, onde se possam basear as decisões a tomar. A maioria da legislação comunitária sobre a água, inclui obrigações de monitorização da qualidade de águas relevantes e/ou de actividades relevantes. A maioria dos **Estados-Membros incorporaram já tais requisitos nas suas redes nacionais ou regionais de monitorização.** Em Portugal Continental, com a passagem de competências de monitorização da Direcção-Geral dos Recursos Naturais (actual Instituto da Água) para as Direcções Regionais de Ambiente (DRAs), a monitorização quantitativa e qualitativa das águas subterrâneas sofreu um processo de descontinuação de procedimentos. Em 1999 a situação ainda não está resolvida...

Ao ter sido aceite o conceito de uma mais ampla Directiva Quadro da Água pelos Estados-Membros, incluindo naturalmente Portugal, defenderam-se os argumentos a favor de serem também incorporados, a nível nacional, os **requisitos da monitorização.**

Um outro argumento a favor de tal abordagem é a necessidade de comparabilidade dos resultados na União Europeia. A Agência Europeia do Ambiente (AEA) está a examinar as vias pelas quais este tema pode ser melhorado. A Comissão comprometeu-se a trabalhar em sintonia com a AEA, para a consideração das implicações da Directiva Quadro no domínio da monitorização.

Há também razão para se incorporar mais informação quantitativa nos dados de monitorização, em particular da quantidade de água captada e utilizada para vários fins.

No que se refere à obtenção territorial dos dados, sugere-se que os mesmos sejam feitos no âmbito da Gestão por Bacias Hidrográficas. Salienta-se o seguinte no que se refere às águas subterrâneas:

Os aquíferos (reservatórios naturais das águas subterrâneas) nem sempre formam uma unidade facilmente identificável e não há uma unidade administrativa "natural" óbvia para a gestão dos seus recursos hídricos. Mais ainda, as suas áreas nem sempre coincidem com as das bacias hidrográficas. Contudo, para a maior parte das situações práticas, e dada a importância de se integrar a gestão das águas subterrâneas e das águas superficiais, parece lógico incorporar ambas, juntamente com as águas costeiras (junto à embocadura dos rios), sob a direcção ou a coordenação da autoridade de bacia.

Assim, incluem-se também os dados referentes aos aquíferos partilhados por duas ou mais bacias hidrográficas. Tal é o consenso, facilmente obtido em Portugal, sobre a metodologia de análise de aquíferos partilhados, para a elaboração dos Planos de Bacia Hidrográfica de Portugal Continental, em curso em 1999.

3. MONITORIZAÇÃO QUANTITATIVA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

3.1 Objectivos

De acordo com JEDLITSCHKA (1992), o planeamento e a implementação de uma rede de monitorização de águas subterrâneas são determinados pelos aspectos que se apresentam em seguida.

Uma rede de monitorização de águas subterrâneas tem por objectivo fornecer informação sobre o estado das águas subterrâneas; os dados de interesse relacionam-se com alterações de

longo ou de curto prazo nos níveis piezométricos e também na qualidade da água. Em diversos casos as redes de monitorização são estabelecidas com o objectivo de se determinarem os efeitos causados pela actividade humana.

3.2 Factores Quantitativos

O estado das águas subterrâneas depende das condições naturais e, de forma crescente, da intervenção humana. Estes factores devem ser tidos em consideração no planeamento e na implementação de uma rede de monitorização de águas subterrâneas. Os factores mais influentes são as condições climatéricas, a geomorfologia, o uso do solo, a geologia (litologia e tectónica) e a utilização de águas superficiais e subterrâneas.

3.3 Pontos de Observação

Devem ser inventariados os pontos de observação existentes para se aceder às águas subterrâneas, tais como piezómetros, furos, fontes e escavações. Deve ser avaliada a adequação desses pontos para estações de monitorização antes de serem incluídos na rede, ou então devem ser considerados novos pontos de medição na sua vizinhança.

3.4 Grupos de Redes

Em geral a monitorização de águas subterrâneas pode ser dividida em três grupos de redes, em função do objectivo para que são construídas:

- Rede básica para a monitorização, numa região e sem limites temporais, dos níveis piezométricos.
- Redes de monitorização suplementares para se poder aumentar a densidade de pontos de observação em determinadas áreas, e/ou em determinados períodos de tempo, ou para observação esporádica dos níveis piezométricos em situações de dúvidas quanto ao comportamento hidrodinâmico dos sistemas aquíferos (modelos de águas subterrâneas ou mapas de isopiezas).
- Redes especiais para a observação de uma área restrita, e num tempo limitado, como parte de um trabalho público ou privado, para fins de planeamento e para recolha de dados

quantitativos e/ou qualitativos. Este tipo de redes especiais podem também ser desenvolvidas por e para projectos de investigação.

3.5 Requisitos para a Definição da Densidade e da Frequência de Amostragem, através da Análise da Variabilidade Espacial e Temporal

3.5.1 Considerações Gerais

O objectivo desta secção é apresentar os requisitos necessários para se atingirem objectivos específicos de monitorização. Nesta secção definem-se os critérios *densidade* e a *frequência* óptima de amostragem, tendo-se em atenção a variabilidade dos parâmetros a serem medidos.

RIBEIRO *et al.* (1995a,b) avaliaram o grau de adequação de programas de observação, face aos objectivos para que foram definidas as redes. LOBO-FERREIRA *et al.* (1995) analisaram as relações entre as variabilidades espacial e temporal com a densidade e a frequência das observações. As considerações que se seguem têm em conta os resultados alcançados nesses estudos comunitários.

3.5.2 Variabilidade Espacial em Redes Nacionais/Regionais Principais ou de Referência

As observações dos aspectos quantitativos das águas subterrâneas, ao contrário do que acontece com as águas superficiais, são caracterizadas por uma variação relativamente pequena das condições no tempo e por uma variação grande das condições no espaço. Em consequência, a densidade de pontos de observação deve ser maior. Este facto resulta do escoamento subterrâneo, nos sistemas hidrogeológicos, ser muito dependente das condições geológicas. As suas alterações devem-se a causas naturais: a heterogeneidade dos aquíferos resulta da diversidade de materiais geológicos no subsolo. Esta aleatoriedade espacial é confirmada em ensaios de laboratório ou de campo.

Assim, a variabilidade espacial deve ser considerada como um dos critérios fundamentais na concepção de redes.

Dependendo da quantidade de informação disponível, esta variabilidade espacial pode ser caracterizada estocasticamente por uma função de auto-correlação (*e.g.* um variograma) que

define a heterogeneidade do aquífero. A natureza do meio a ser monitorizado (poroso, cársico, fracturado), implica que cada sistema aquífero tenha a sua variabilidade particular.

Tomando em consideração os objectivos principais para uma rede quantitativa de águas subterrâneas, *i.e.* (1) a determinação do nível piezométrico em grandes áreas não-exploradas, (2) a determinação da direcção de escoamento subterrâneo, e (3) a avaliação das componentes do balanço hídrico subterrâneo, estamos interessados em projectar uma rede piezométrica que permita a observação dos gradientes hidráulicos, reflectindo as diferenças regionais, como é apontado no programa de trabalhos do Centro Temático para as Águas Interiores da Agência Europeia do Ambiente, instituição para a qual foi desenvolvido o estudo LOBO-FERREIRA *et al.* (1995).

Por conseguinte o espaçamento entre furos de observação deve ser mais baseado num critério científico, do que num critério empírico, *i.e.* um padrão geométrico geral (uma matriz rectangular ou uma forma triangular). Por outras palavras, o sistema de monitorização proposto deve incorporar as particularidades da estrutura do sistema, medida pela sua função de auto-correlação. A piezometria é a variável de estado relevante para se poder avaliar as principais características do sistema. Em condições naturais o estado da piezometria reflecte muito bem o gradiente do escoamento subterrâneo. O variograma experimental calculado com os dados espaciais constitui uma classe de funções experimentais com formas próprias (idiossincráticas), na qual o comportamento não-estacionário se manifesta.

A densidade óptima de amostragem, nestas redes principais de amostragem, será avaliada tendo em consideração a distribuição espacial do conjunto (distribuição desigual ou agrupada em conjuntos), por determinação da contribuição específica de cada estação de monitorização para o cálculo do gradiente hidráulico. Esta determinação pode ser facilmente efectuada pelo método da *krigagem*, que fornece a estimativa do valor médio de um parâmetro específico (em todo o domínio) e também a estimativa do erro associado realçando as áreas com carência de monitorização. Adicionando uma estação, ou anulando-a de uma rede de observação, pode-se inferir sobre a importância relativa, respectivamente com o aumento ou com a diminuição da variância da estimativa. Esta refere-se à distribuição espacial da média dos valores piezométricos de todo o aquífero. Pode-se, assim, determinar a distribuição óptima para novos pontos de amostragem (aumentando a rede) ou para seleccionar as estações dispensáveis (para diminuir a rede, *cf.* RIBEIRO, 1992).

3.5.3 Variabilidade Espacial em Redes Específicas, Complementares ou Especiais

As redes específicas são projectadas em áreas de impacto de actividades humanas, que conduzem à sobreexploração de aquíferos.

Devido a factores antropogénicos, a variabilidade piezométrica espacial pode ser modificada em consequência da alteração dos padrões da piezometria regional. O resultado sobre a estrutura espacial da variável é imediato. Em condições de escoamento natural, o variograma experimental calculado em relação aos dados da piezometria regional exibe um comportamento não-estacionário, que reflecte os gradientes do escoamento subterrâneo. Se um processo externo for a causa da modificação da forma do variograma, podemos detectar a sua correlação espacial.

De entre os processos externos podemos sublinhar a situação de sobreexploração, que conduz ao desenvolvimento de importantes cones de depressão ou o caso de fenómenos de recarga que actuam numa região específica.

Podem deduzir-se duas estruturas: a da região próxima, principalmente reflectindo a variabilidade da acção recarga/descarga, e a da região afastada, mais relacionada com o escoamento regional.

Nestes casos a densidade óptima de amostragem depende (1) do local, (2) da informação de suporte e (3) da disponibilidade de dados na vizinhança das áreas em depressão (*stress*). O estudo do regime artificial de águas subterrâneas, nos principais aquíferos em exploração, requer uma densidade muito maior de monitorização do que nas áreas em regime natural.

Visando a caracterização da intensidade e do desenvolvimento dos cones de depressão, no tempo e no espaço, os furos de monitorização são distribuídos de acordo com padrões de cálculo, derivados da variabilidade espacial local. Estes piezómetros devem ser distribuídos pelo centro do cone de depressão, pelas suas pendentes e fora do cone. A presença de furos dentro do cone de depressão permite determinar a natureza da curva de depressão desenvolvida em resultado da exploração. Os outros furos, localizados fora da área deprimida, permitem determinar o regime natural das águas subterrâneas.

A configuração geométrica (incerta) dos cones de depressão, derivada das heterogeneidades locais, pode ser calculada pela análise de imagens equiprováveis, correspondentes aos vários

cenários de exploração construídos com técnicas de Simulação Geostatística Condicional. Assegura-se assim a localização dos furos, com base numa análise robusta (*cf.* RIBEIRO, 1993).

A extracção intensa de água, resultante do abastecimento a centros urbanos ou industriais, produz fortes alterações no equilíbrio com outros sistemas, como por exemplo com rios, com outros aquíferos, ou com o mar. Em relação às zonas costeiras, podem ser projectadas redes de monitorização especiais para permitir o acompanhamento da interface água doce / água salgada em sistemas aquíferos costeiros, seguindo os requisitos anteriormente propostos e a dinâmica particular do mar.

3.5.4 Variabilidade Temporal em Redes Específicas, Complementares e Especiais

A determinação da frequência óptima, implica também uma avaliação da variabilidade temporal, devido à não-estacionaridade do escoamento onde se está a efectuar a extracção. Tal como no domínio espacial, a variabilidade temporal pode ser caracterizada por uma função de auto-correlação.

Os intervalos de tempo entre as sucessivas observações devem depender da finalidade para a qual os dados estão a ser recolhidos, sendo um dos objectivos a detecção das tendências a longo-prazo, em redes principais, ou a tendência a curto-prazo, em redes específicas.

É também importante definirem-se as flutuações piezométricas, porque estas são normalmente o reflexo da hidrogeologia local e das condições de recarga-descarga dos aquíferos. Por conseguinte, um dos requisitos para a determinação da frequência de amostragem de redes de monitorização quantitativas é a necessidade de reconhecer, no mesmo sistema aquífero, as várias tendências temporais, de forma a se poder interpretar o seu significado em termos de escoamento subterrâneo. Tal é fortemente recomendado quando se trata de aquíferos heterogéneos.

Os padrões da flutuação piezométrica podem ser interpretados como resultantes de factores antropogénicos. Este é o caso de mudanças sazonais (na frequência de amostragem), em piezómetros para observação do abastecimento de água subterrânea, por exemplo a centros turísticos.

Para se detectarem e avaliarem tendências e taxas de variação da piezometria, podem usar-se testes estatísticos não-paramétricos. Estes testes são muito adaptados às especificidades e às características das séries temporais, incluindo a consideração de eventuais lacunas, *i.e.* valores em falta, valores erróneos (*i.e. outliers*) ou sazonalidade. Assim esses testes podem medir a relevância de tendências crescentes ou decrescentes, com a confiança estatística que se desejar.

Podem ser sintetizados índices piezométricos sazonais, que dão indicações das tendências de variação da piezometria. Esses índices são construídos com técnicas discriminantes robustas, e classificados por métodos *clustering* (*cf.* RIBEIRO, 1989; 1995). Os índices permitem o agrupamento de estações com características e tendências temporais semelhantes, para certas zonas hidrogeológicas.

3.6 Análise Custo-Eficácia Aplicada a Programas de Monitorização

Por razões técnicas e económicas verifica-se uma necessidade crescente de optimização das redes existentes para que, correspondendo aos requisitos impostos, melhorem a relação custo-eficácia. Por outras palavras, como foi referido por RIBEIRO *et al.* (1995a,b,c), o projecto de uma rede deve ser baseado na maximização do valor económico dos dados a colectar.

Definindo eficácia de um programa de monitorização como *o grau de satisfação com que a informação obtida corresponde aos objectivos do programa*, uma medida desta eficácia deverá integrar a frequência, a densidade e outros parâmetros tais como a acessibilidade aos locais de observação. No que respeita aos custos de monitorização, o projecto de redes deve ser suficientemente flexível para permitir a utilização de estações de monitorização existentes, criadas para outros fins.

Comparando ou medindo a eficácia com os custos pode-se seleccionar o programa de monitorização óptimo.

RIBEIRO *et al.* (1995a,b) juntam ao dilema estatístico *how large is large* (*i.e. grande é quanto?*) o dilema económico *when enough is enough* (*i.e. suficiente é quanto?*).

3.7 Recomendações

Para a rede básica é recomendável que a densidade objectivo dos piezómetros, furos, etc., para observação de parâmetros quantitativos de águas subterrâneas, possa ser, pelo menos de 1

estação por cada 100 km^2 (*cf.* VRBA (1991) e LOBO-FERREIRA *et al.*, 1995). Note-se que a proposta de optimização da rede espanhola para observação de parâmetros quantitativos de águas subterrâneas, de acordo com VARELA (1992), mudará de 1 estação por cada 51 km^2 para 1 estação por cada 91 km^2. Só após o sucesso desta primeira fase, numa segunda fase, se recomendará se a densidade da rede deve ser revista, de acordo com a fundamentação conceptual apresentada anteriormente neste capítulo. A densidade de amostragem óptima nestas redes principais será calculada, tomando em linha de conta a distribuição espacial das estações actuais no seu todo (mesmo que estejam mal distribuídas ou agrupadas em *cachos* de piezómetros), pela determinação da contribuição específica de cada estação de monitorização no cálculo do gradiente hidráulico. Isto pode ser facilmente feito através de *krigagem* (*cf.* RIBEIRO, 1992) ou por modelação estocástica inversa (conforme se exemplifica para o aquífero de Rio Maior em RUBIN *et al.*, 1990). Esses métodos fornecem a estimativa de um valor médio, do parâmetro específico em análise, em todo o domínio do aquífero, e ainda o erro de estimação associado, realçando as áreas com monitorização insuficiente. Adicionando uma estação ou retirando-a da rede de monitorização, pode-se inferir a importância relativa, respectivamente pelo aumento ou pela diminuição da variância da piezometria regional média do aquífero. Pode-se, assim, determinar a localização óptima de futuros pontos de amostragem (para aumentar a rede) ou para seleccionar as estações indispensáveis (para reduzir a dimensão da rede).

Em regra, as estações de medição da rede básica deveriam ser equipadas com registadores contínuos (registadores mecânicos ou electrónicos). Medições individuais, manuais, seriam feitas, de acordo com as características hidrogeológicas do aquífero (*e.g.* aquíferos porosos, fracturados ou cársicos), para permitir a monitorização em intervalos de 1 semana a 6 meses.

Como mencionado anteriormente, neste capítulo, a frequência óptima de amostragem requer uma avaliação da variabilidade temporal, devido à não-estacionaridade do escoamento subterrâneo, particularmente quando o aquífero estiver sujeito a extracções. Os intervalos de tempo entre observações sucessivas devem depender dos objectivos para os quais os dados estão a ser recolhidos, sendo um dos objectivos a detecção das tendências a longo-prazo (nas redes principais) ou tendências a curto-prazo (nas redes específicas). É também importante definir as flutuações de forma da superfície piezométrica, porque estas são em geral o reflexo de condições de recarga ou de descarga de sistemas aquíferos (livres). Assim, um dos requisitos para o projecto da frequência de amostragem, em redes quantitativas, é a

necessidade de se reconhecer, no mesmo sistema aquífero, vários padrões temporais, de forma a se poder interpretar o seu significado em termos de escoamento subterrâneo. Tal está fortemente relacionado com a heterogeneidade do aquífero.

4. MONITORIZAÇÃO QUALITATIVA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

4.1 Objectivos

4.1.1 Caracterização da Qualidade das Águas Subterrâneas

A caracterização global da qualidade das águas de um aquífero desenvolve-se em diversas etapas que antecedem a recolha de amostras para análise química (a fase final de caracterização). A caracterização global pode dividir-se nos seguintes pontos:

- análise de estudos anteriores;
- caracterização das condições hidrogeológicas e hidrodinâmicas da região;
- formulação de um modelo conceptual de escoamento e transporte;
- realização de algumas análises químicas de amostras de água recolhidas em furos ou poços existentes, com vista a confirmar os dados espectáveis;
- instalação das infraestruturas adequadas à monitorização do aquífero, em termos quantitativos e qualitativos;
- monitorização estática com sonda multiparamétrica;
- recolha de amostras para análise química laboratorial;
- análise dos resultados obtidos;
- modelação do escoamento.

Após a instalação dos novos furos de monitorização é traçado um plano de trabalhos para a caracterização da qualidade das águas subterrâneas do aquífero, na região e ao longo do tempo.

4.1.2 Práticas de Monitorização Qualitativa de Aquíferos

LEITÃO *et al.* (1992) e LEITÃO *et al.* (1994) desenvolveram estudos sobre a reabilitação de aquíferos poluídos, tendo aplicado as metodologias analisadas ao caso-de-estudo das águas subterrâneas do aquífero de Estarreja. Para a caracterização do aquífero livre superficial de Estarreja, foram instalados 43 piezómetros. A experiência então adquirida pelo LNEC.DH.GIAS, facilitou a abordagem do tema desta secção, *i.e. práticas de monitorização qualitativa de aquíferos*.

O principal ponto de partida de qualquer processo de monitorização de águas subterrâneas é o de conservar, na medida do possível, as condições hidrogeológicas e hidroquímicas naturais, isto é, efectuar a instalação dos furos por processos que não alterem as condições de escoamento da região utilizando materiais de revestimento indicados para os tipos de poluentes existentes. Com isto pretende-se que a composição química da água não sofra alteração quer por reacção com o material do furo quer pela sua instalação.

Os objectivos primários de um furo de monitorização são: (1) permitir o acesso a um local de medição do nível das águas subterrâneas e (2) permitir a extracção de amostras de água que sejam representativas do local amostrado. Um método de furação que se revela muito apropriado neste tipo de estudos é a percussão mecânica. Conjuga duas importantes vantagens: a furação é conseguida sem injecções de materiais e permite efectuar em paralelo a recolha de tarolos com o perfil do solo intacto. Quando o tipo de solo a atravessar o permite esta técnica é, em geral, a mais indicada.

Não só a selecção dos locais onde se devem colocar os furos na área de estudo é importante, mas também a forma de extracção de amostras é factor determinante para a obtenção de resultados satisfatórios. Basicamente, estas técnicas dependem do conhecimento do tipo de aquífero, isto é, da sua litologia e estrutura, e do tipo de poluentes a analisar.

A recolha de amostras requer a construção prévia de um modelo conceptual com base: (1) no tipo de fontes poluidoras; (2) nos locais de rejeição; (3) no regime hidrodinâmico das águas subterrâneas e (4) no tipo de poluentes. É essencial que se efectue uma análise detalhada do tipo de poluente e do seu comportamento na água e no solo do aquífero onde se encontra.

4.2 Factores Qualitativos

A qualidade química primária das águas subterrâneas está intimamente relacionada com o tipo de formações por onde circula e que lhe conferem determinadas características químicas próprias. A qualidade das águas é, contudo, frequentemente alterada como resultado indirecto das actividades urbanas, agrícolas, pecuárias e industriais. De facto, todas estas actividades contribuem de algum modo para a deposição não controlada de poluentes no solo, que são posteriormente lixiviados e transportados pela água da chuva, durante a infiltração, para as águas subterrâneas.

As actividades que maior influência têm na alteração/deterioração da qualidade das águas são usualmente agrupadas em actividades urbanas, agropecuárias e industriais, repartindo-se a sua acção da seguinte forma:

1. Actividade urbana: A evacuação e tratamento dos efluentes líquidos e sólidos das áreas urbanas (tratamento dos esgotos e dos lixos das populações), situação que contribui de forma mais evidente para a poluição dos aquíferos.

No nosso País, estimativas de 1999 de níveis de atendimento de saneamento básico em Portugal Continental, apontam a inexistência de sistemas de recolha e tratamento de esgotos para cerca de, respectivamente, 25% e 45% da população. Tal tem contribuído para a utilização, durante longos períodos, de fossas sépticas, frequentemente não limpas com a periodicidade necessária, ou ainda a utilização de outros tipos de soluções, sem a preocupação de protecção das águas subterrâneas. Presentemente projecta-se a recuperação desta situação até ao ano 2005 (ano de finalização do 3º Quadro Comunitário de Apoio) quando se pretende conseguir para Portugal as médias comunitárias de atendimento. Tal virá certamente a contribuir de forma positiva para o controlo desta situação, sem contudo permitir solucionar os danos anteriormente causados ao ambiente, que terão de ser objecto de reabilitação específica, conforme é referido no Capítulo Quarto.

Por outro lado, as áreas projectadas para tratar efluentes ou resíduos e que apresentam deficiências de funcionamento podem também provocar problemas de poluição. São exemplo os aterros sanitários, as bacias e as lagoas de efluentes líquidos, as lamas e os contentores de resíduos não impermeabilizados ou que apresentem rupturas. As actividades referidas contribuem para a existência de poluição essencialmente no que respeita a níveis elevados de contaminação orgânica, coliformes e compostos inorgânicos não metálicos.

2. Actividade agropecuária: Estes dois sectores têm uma importância fundamental na origem dos problemas de contaminação do País, pelo menos no que diz respeito à sua dispersão geográfica. No que respeita à agricultura, a origem destes problemas deve-se à generalizada ausência de aplicação dos conhecimentos subjacentes a uma agricultura moderna e simultaneamente protectora do ambiente, onde se evitam utilizações excessivas de fertilizantes e pesticidas. Como consequência é dissolvida e arrastada uma grande parte dos elementos móveis aplicados aos solos.

No caso da pecuária os efeitos da poluição revelam-se na deposição directa de excrementos, estrume, etc., no solo e sua subsequente migração. Os efeitos de ambos os tipos de poluição traduzem-se nos índices de contaminação orgânica, compostos inorgânicos não metálicos, coliformes e pesticidas encontrados nas águas.

3. Actividade industrial: A indústria mineira, de produção de papel, produção de adubos e outros produtos químicos são alguns exemplos das fontes de poluição de origem industrial. As formas de poluição têm origem nos processos de rejeição de efluentes líquidos em linhas de água a céu aberto e de parques de lamas não impermeabilizados, portanto com deposição directa no solo e consequente migração de elementos até às águas subterrâneas. Estes casos, e também a deposição de poluentes atmosféricos no solo, constituem os problemas mais graves de poluição industrial no País.

4.3 Mecanismos de Contaminação das Águas Subterrâneas

De acordo com LOBO-FERREIRA (1993), os processos de contaminação das águas subterrâneas, geralmente referido como transporte de poluentes, estão intimamente relacionados com o modo como se processa a recarga e o escoamento da água nos aquíferos. A importância do termo vulnerabilidade, introduzido no Capítulo Segundo, que define em termos genéricos a maior ou menor susceptibilidade de um aquífero ser poluído, surge aqui para referir alguns dos factores que intervêm na compreensão do fenómeno de propagação da poluição. O grau de contaminação depende directamente do tipo de solos que formam o aquífero e que estão sobre o aquífero, a profundidade da zona vadosa, o material do aquífero e a condutividade hidráulica. São estes factores que afectam directamente o escoamento e o tempo de contacto entre a água e os poluentes retidos no solo, determinando assim a sua retenção ou a migração.

Integra-se no ciclo hidrológico o movimento da água nos aquíferos. São determinantes para o movimento das cargas poluentes os processos de reacções químicas, nomeadamente de adsorção iónica (quase sempre reversível), que se passam ao nível do solo, antes de atingir as águas subterrâneas, pois muitas vezes o solo serve de tampão acumulando poluentes à sua superfície e evitando a sua migração posterior. Estes fenómenos são, no entanto, muito difíceis de quantificar, uma vez que estão dependentes das condições químicas e físicas do meio, nomeadamente da temperatura, pH e condições de oxidação/redução.

4.4 Monitorização em Condições Estáticas

De acordo com LEITÃO *et al.* (1994), após a instalação dos furos de monitorização e antes de se dar início à recolha de amostras de água para análise química laboratorial há um conjunto de medições de campo que importa realizar sem se perturbar o equilíbrio físico e químico local com a própria acção de amostragem. Denomina-se este processo de monitorização em condições estáticas. Deve decorrer pelo menos uma semana de intervalo entre a instalação do furo e a recolha de qualquer informação por forma a poder restabelecer-se o equilíbrio das condições naturais do aquífero.

ALLER *et al.* (1989) e CANTER *et al.* (1987) sugerem um conjunto de práticas ou procedimentos gerais para medição de parâmetros físicos e químicos, com o aquífero em equilíbrio, e que se resumem aos seguintes aspectos:

1. medição do nível piezométrico para obtenção de um mapeamento regional dos níveis piezométricos;
2. registo contínuo dos seguintes parâmetros na água: condutividade, pH, temperatura e, se possível, o oxigénio dissolvido, a resistividade, os sólidos dissolvidos totais, a salinidade e o Eh.

Estes parâmetros devem ser medidos através de uma sonda de registo contínuo. Esta sonda deve ser descida lentamente e, de 0,5 em 0,5 m ou de 1 m em 1 m, registados os parâmetros referidos por forma a se obter uma variação vertical das propriedades do aquífero.

Esta medição constitui uma primeira aproximação da variação vertical das propriedades da água, nomeadamente se existe estratificação da água. É um excelente auxiliar na decisão dos níveis a amostrar na medida em que permite detectar, caso existam, as diferenças mais marcantes da qualidade da água.

4.5 Monitorização em Condições Dinâmicas

O início do processo de recolha de amostras de água deve suceder a monitorização em condições estáticas. A utilização de toda a informação recolhida nas etapas anteriores é essencial, nomeadamente no que diz respeito à detecção de eventuais estratificações da água e/ou de camadas de fluidos com densidades diferentes das da água.

Antes de se proceder à recolha de amostras de água para análise, importa certificar a sua representatividade em relação à água do furo. Para o efeito, antes da amostragem de água subterrânea, devem ser retiradas várias amostras de água para se analisar, no local, os parâmetros condutividade, temperatura e pH da água que sai do furo, à medida que se vai extraindo (ALLER *et al.*, 1989). A água deve ser continuamente extraída, e os parâmetros referidos medidos, até que haja estabilização dos seus valores. Observa-se que, de um modo geral, os parâmetros referidos estabilizam ao fim de se bombear o equivalente a três volumes da zona saturada do furo (CLARK, 1992). Quando este equilíbrio é atingido considera-se que as amostras são representativas da qualidade da água do local. Nessa altura o caudal de bombagem deve ser gradualmente diminuído até se atingir a velocidade própria para amostragem (entre 0,1 e 0,5 l/min). A conservação das amostras deve ser iniciada assim que são recolhidas.

4.6 Outros Comentários sobre Densidade e Frequência de Amostragem

De acordo com VRBA (1991), os métodos usados para o projecto e implementação de redes dependem dos objectivos da monitorização. A delimitação das áreas a monitorizar depende essencialmente da estratégia e dos objectivos da monitorização. As fronteiras naturais e as político-administrativas da área e os recursos financeiros são restrições importantes. Para VRBA (1991), não há regras padrão válidas para dar indicações sobre o número de estações de monitorização por unidade de área. O número de estações cresce com a importância do aquífero. Quando se projecta uma rede em meios fracturados, de forma a estudar o movimento de poluentes, a orientação, a geometria e a permeabilidade do sistema de fracturas têm de ser determinados. Algumas estações de monitorização devem ser localizadas em áreas não afectadas por rebaixamentos, para observações de referência, naturais, e para efeitos de controle.

No Quadro 3.1 apresenta-se uma síntese de um programa tipo de monitorização da qualidade das águas subterrâneas, de acordo com VRBA (1991). O Quadro 3.1 descreve, além da frequência de amostragem geralmente adoptada, os parâmetros químicos analisados para cada tipo de programa e os processos mais importantes a medir em cada estação.

Quadro 3.1 - Síntese dos diversos tipos de programas de monitorização de águas subterrâneas (extraído de LEITÃO, 1997, adaptada de VRBA, 1991)

Programa de monitorização	Importância da estação de monitorização			Frequência de amostragem anual	Variáveis analisadas
	N	T	I		
Internacional	dominante	dominante	Pouco significativa	Baixa (1 a 4 vezes)	B+ O-
Nacional	dominante	dominante	Pouco significativa	Baixa (1 a 4 vezes)	B+ O-
Regional	Pouco significativa	dominante	complementar	Média (2 a 12 vezes)	B+ O+
Local	Pouco significativa	Pouco significativa	dominante	Elevada (mais de 12 vezes por ano)	O+

N - permitir a análise dos valores Naturais das águas subterrâneas
T - permitir a análise de Tendências de alteração das águas subterrâneas, devido a processos naturais ou antropogénicos
I - permitir a análise de alterações consequentes de diversos tipos de Impactes antropogénicos
B - variáveis físicas, químicas e biológicas Básicas incluídas nos valores guias da água para consumo humano
O - Variáveis Opcionais dependentes do programa de monitorização
+ Análises regulares
- Análises esporádicas

Os furos existentes também podem ser incluídos na rede de monitorização, se a informação relevante sobre a sua construção e sobre as condições hidrogeológicas envolventes estiverem disponíveis. As nascentes também podem ser monitorizadas. As outras componentes do ciclo hidrológico, tais como a precipitação e o escoamento superficial devem também ser monitorizados.

Os parâmetros a seleccionar e a frequência de amostragem não podem ser padronizados (para a qualidade) devido às numerosas variáveis envolvidas: (1) os processos cíclicos, naturais, aleatórios e sistemáticos; (2) os objectivos de monitorização; (3) a vulnerabilidade de aquíferos à poluição; (4) a velocidade do escoamento subterrâneo; (5) a disponibilidade de recursos financeiros; e (6) os poluentes ou os elementos naturais a detectar ou a monitorizar. A frequência de amostragem é inicialmente muito mais intensa (dias, horas, ou amostragem contínua), sendo depois ajustada quando os mecanismos de movimento do poluente e a

variabilidade da qualidade da água forem conhecidos. Sistemas automáticos de aquisição de dados são recomendáveis para estações piloto de monitorização.

A recolha periódica de amostras de água subterrânea para análise, nomeadamente de nitratos, nitritos e pesticidas, deverá também ser efectuada em poços e captações de água subterrânea das áreas onde se pratica a rega. Em Portugal a legislação define a periodicidade de amostragem (*cf.* Decreto-Lei 236/98, Artigo 16 - *águas subterrâneas para consumo humano*), números 2 e 3, e anexos IV e V), *i.e.* quatro vezes por ano para nitratos e uma vez por ano para pesticidas.

Assim, o transporte de poluentes provenientes de actividades agrícolas deverá ser observado e monitorizado regularmente nas águas subterrâneas. Sugere-se que tal análise se estenda também ao longo do perfil do solo, na zona vadosa. As áreas prioritárias a monitorizar, *i.e.* com redobrada atenção, deverão ser as áreas mais vulneráveis à poluição. Exemplificando para o caso de Alqueva (*cf.* Capítulo Segundo e LOBO-FERREIRA e OLIVEIRA, 1998) as áreas a observar com maior atenção deverão ser as que possuem os maiores valores dos índices DRASTIC Padrão e DRASTIC Pesticidas dos mapeamentos que podem ser observados em http://www.dh.lnec.pt/gias/novidades/proj_GIAS_internetP.html.

5. A BASE DE DADOS INVENTAR E A MONITORIZAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Para se armazenarem de forma eficiente os resultados das campanhas de monitorização, quer quantitativas, quer qualitativas, recorre-se a bases de dados especificamente desenvolvidas para recursos hídricos subterrâneos. Em Portugal, LOBO-FERREIRA e OLIVEIRA (1993) desenvolveram a primeira base de dados nacional (especificamente) elaborada para águas subterrâneas, no âmbito do projecto comunitário apresentado no Capítulo Segundo, intitulado *Desenvolvimento de um Inventário das Águas Subterrâneas de Portugal*. Essa base de dados que se denominou INVENTAR, contém em 1999, cerca de 10 000 pontos de água com parâmetros hidrogeológicos quantitativos e qualitativos de águas subterrâneas.

Na base de dados INVENTAR existe um vasto conjunto de informação sobre resultados de análises químicas efectuadas em águas subterrâneas.

A base tem também sido aplicada a outros estudos, tendo-se construído base específicas, como por exemplo a base INVENTAR_PBHTEJO. No âmbito de um protocolo estabelecido entre o Instituto da Água e o LNEC, perto de 7 000 pontos de águas subterrâneas, e todo o conteúdo da respectiva informação hidrogeológica e hidrogeoquímica, foram inseridos na base de dados SNIRH_Águas Subterrâneas em 1997. Actualmente estão disponíveis dados quantitativos e qualitativos de algumas centenas de pontos de águas subterrâneas em http://www.inag.pt.

6. MONITORIZAÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM PORTUGAL

6.1 Caracterização da Situação Nacional

6.1.1 Caracterização Geral

A monitorização quantitativa e a monitorização qualitativa de águas subterrâneas foi desenvolvida, em Portugal, à escala nacional (NUTS I) desde 1978, pela ex-Direcção Geral dos Recursos e Aproveitamentos Hidráulicos e desde o início da década de 90 pelo Instituto da Água - INAG. No entanto, desde 1993 estas responsabilidades foram transferidas para as Direcções Regionais do Ambiente - DRAs. De acordo com LOBO-FERREIRA *et al.* (1996), actualmente, devido a dificuldades orçamentais e a carência de pessoal, **só se está a levar a cabo muito restritamente a monitorização de águas subterrâneas à escala regional** (NUTS II). Contudo, durante o período da seca de 1993-1995, a monitorização da piezometria foi de novo efectuada a nível nacional, tendo os resultados sido publicados pelo INAG. Complementarmente, a EPAL e os serviços municipalizados ou multimunicipais de água e saneamento do País vêm procedendo regularmente à monitorização qualitativa das águas subterrâneas. Durante a década de 90, no âmbito de diversos estudos e projectos de investigação aplicada, foram ou estão ainda a ser desenvolvidos estudos para a monitorização quantitativa e qualitativa de numerosos sistemas aquíferos nacionais. Salientam-se os seguintes estudos, de assinalável profundidade, por ordem cronológica do seu início:

- Durante 1993, no âmbito do protocolo estabelecido entre a **Direcção-Geral do Ambiente** (DGA) e o **LNEC.DH.GIAS** para caracterização do estado de poluição das águas

subterrâneas do aquífero de **Estarreja**, na Região Centro, foram instalados 43 novos piezómetros. Procedeu-se à monitorização qualitativa e quantitativa global das águas subterrâneas do aquífero de Estarreja de 1993 a 1995 (*cf.* LEITÃO *et al.* (1994) e LEITÃO, 1997).

- Projecto "**Estudo dos Recursos Hídricos Subterrâneos do Alentejo** (ERHSA)", coordenado pela Comissão de Coordenação da Região do Alentejo (CCRA) desenvolve-se do último trimestre de 1996 ao ano 2000. O ERHSA integra, na sua elaboração, quatro entidades: o **Instituto da Água** (INAG), o **Instituto Geológico e Mineiro** (IGM), a **Direcção Regional do Ambiente do Alentejo** (DRA - Alentejo) e a **Universidade de Évora** (UE). A Universidade de Évora e a **Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa** (FCUL), através do seu Departamento de Geologia, desenvolvem trabalho conjunto, no âmbito de protocolo próprio. Este Projecto envolve o estudo hidrogeológico e a monitorização de todo o Alentejo. Para os dez sistemas aquíferos identificados na região do Alentejo, as equipas do ERHSA têm efectuado periodicamente campanhas de amostragem, para caracterização da qualidade das suas águas subterrâneas, num total de pontos de amostragem que ascende a 331.

- Está em curso desde 1998, por um período de três anos, um protocolo estabelecido entre o **Instituto da Água** e o **Instituto Superior Técnico** que visa a restruturação e a optimização das redes de monitorização de águas subterrâneas existentes em Portugal Continental, nas vertentes de quantidade e de qualidade, visando ainda a extensão da monitorização a zonas onde se verificam lacunas de informação. Está em finalização (em Abril de 1999) um relatório do INAG intitulado "**Implementação de Redes Expeditas**" que abrange todos os sistemas aquíferos da Orla Ocidental, da Bacia do Tejo/Sado, da Orla Meridional e ainda as águas subterrâneas do Maciço Antigo (*cf.* apresentação de CUPETO e LOPES, 1999).

- No âmbito dos estudos desenvolvidos para o Plano de Bacia do rio Tejo pelo consórcio Hidrotécnica Portuguesa, Gibb, Procesl e Hidrorumo, que inclui a equipa do **LNEC.DH.GIAS**, desenvolveu-se uma campanha de monitorização das águas subterrâneas dos sistemas aquíferos do **Baixo Tejo e Sado,** em Outubro/Novembro de 1998. A campanha foi suportada financeiramente pelo **Instituto da Água.** No ponto 6.1.4 descreve-se esta campanha, com base na apresentação efectuada por LOBO-FERREIRA *et al.* (1999b).

6.1.2 Antecedentes da Monitorização Quantitativa das Águas Subterrâneas Portuguesas

6.1.2.1 Na Região do Algarve

A partir de 1978 e até 1994, monitorizaram-se mensalmente de 120 a 150 piezómetros no Algarve. Alguns desses piezómetros estão equipados com equipamento limnigráfico automático. Em 1992 foi elaborado um inventário dos dados piezométricos da região.

6.1.2.2 Na Região Centro

A partir de 1978 e até 1994, monitorizaram-se mensalmente de 50 a 100 piezómetros na Região Centro.

6.1.2.3 Na Região de Lisboa e Vale do Tejo e na Região do Alentejo

A partir de 1978 e até 1994, monitorizaram-se mensalmente cerca de 260 piezómetros na Região de Lisboa e Vale do Tejo e na Região do Alentejo. Desses 260 piezómetros, cerca de 100 a 150 foram monitorizados mensalmente, sendo os restantes monitorizados uma vez de três em três meses ou de seis em seis meses; 5 piezómetros estavam equipados com equipamento de registo automático (somente três estavam em funcionamento em 1996).

No âmbito do Estudo dos Recursos Hídricos Subterrâneos do Alentejo (ERHSA), existe um vasto conhecimento e informação, tanto sobre o Maciço Antigo como sobre as formações sedimentares desta região. No Capítulo Sexto apresentar-se-á este estudo em pormenor. Os elementos recolhidos pelo ERHSA são essenciais para a definição da futura rede de quantidade da Direcção Regional do Ambiente do Alentejo.

6.1.3 Antecedentes da Monitorização Qualitativa das Águas Subterrâneas Portuguesas

6.1.3.1 Região do Algarve

A partir de 1978 e até 1994, monitorizaram-se mensalmente cerca de 74 piezómetros no Algarve. Adicionalmente 27 furos de observação estavam a ser monitorizados cada três

meses, principalmente para controle da intrusão salina. A água subterrânea dos furos destinados ao abastecimento público é controlada qualitativamente. Em 1992 deu-se início a um inventário da qualidade das águas subterrâneas. Também em 1992, deu-se início à monitorização de alguns furos localizados perto de aterros sanitários.

A periodicidade das campanhas de amostragem no Algarve é semestral. Contudo, tanto quanto se sabe, em 1999 dos 15 parâmetros estabelecidos para análise pela legislação vigente (*cf.* Decreto-Lei Nº 236/98 de 1 de Agosto) apenas estão a ser analisados cerca de metade dos parâmetros de qualidade do grupo G1, apenas um parâmetro do grupo G2 e nenhum parâmetro do grupo G3.

6.1.3.2 Região Centro

De 1978 a 1987, cerca de 24 piezómetros foram monitorizados qualitativamente. De acordo com LOBO-FERREIRA *et al.* (1996), em 1996, não se registava nenhuma campanha periódica de controle da qualidade das águas subterrâneas na Região Centro, principalmente devido a carências orçamentais e/ou à falta de equipamento laboratorial apropriado nessa região.

6.1.3.3 Região de Lisboa e Vale do Tejo e na Região do Alentejo

Cerca de 100 piezómetros e furos de captação de águas subterrâneas foram monitorizados de 1978 a 1994, especialmente durante a década de 80. Periodicamente foram efectuadas análises de qualidade das águas subterrâneas, principalmente para a caracterização de cloretos, sulfatos e nitratos. De acordo com LOBO-FERREIRA *et al.* (1996), em 1996 não se registava nenhuma campanha periódica de controle da qualidade das águas subterrâneas da região, principalmente devido a carências orçamentais e/ou à falta de hidrogeólogos na Direcção-Regional de Ambiente da Região de Lisboa e Vale do Tejo.

A **EPAL**, que abastece a área Metropolitana da Grande Lisboa (com cerca de 2 milhões de habitantes) monitoriza a qualidade das águas subterrâneas de cerca de 29 furos de captação dos aquíferos do Baixo Tejo-Sado. A EPAL realiza ainda análises químicas de cerca de outros 100 furos localizados noutros aquíferos de Portugal Continental, também destinados ao abastecimento público, propriedade dos serviços municipalizados de Portimão, de Faro, do Cadaval, de Almada, de Castelo Branco, de Oeiras, de Vila Real, de Braga e do Porto.

6.1.4 A Campanha de Amostragem de Águas Subterrâneas dos Sistemas Aquíferos do Baixo Tejo e Sado Desenvolvida pelo LNEC em Outubro e Novembro de 1998

6.1.4.1 Introdução

Foi desenvolvida pelo LNEC em Outubro e Novembro de 1998 uma campanha de monitorização das águas subterrâneas dos sistemas aquíferos do Baixo Tejo e Sado. Essa campanha visou a caracterização do panorama global da qualidade dos recursos hídricos subterrâneos da região em 1998, através da realização de amostragem em cerca de 71 furos.

6.1.4.2 Principais Ganhos de Informação Obtidos pela Campanha do LNEC

Os principais ganhos de informação obtidos na Campanha do LNEC.DH.GIAS de Outubro/Novembro de 1998 foram os seguintes:

- Caracterização da situação actual (*em 1998*) da qualidade das águas subterrâneas na origem, em diversas zonas sujeitas a diferentes riscos de poluição e em aquíferos com diferente vulnerabilidade à poluição;
- Análise da evolução da qualidade, por comparação dos resultados com furos com análises químicas anteriores;
- Caracterização da qualidade bacteriológica (exceptuando a Bacia do Tejo/Sado Margem Direita, a informação disponível era muito escassa; apenas se dispunha de 32 análises para todos os restantes sistemas, tendo sido duplicada a informação);
- Análise de pesticidas e de herbicidas nas águas subterrâneas (não se dispunha de informação);
- Identificação de zonas com poluição agrícola;
- Identificação de zonas de risco de sobreexploração.

6.1.4.3 Critérios para a Selecção dos Pontos de Amostragem

A selecção de um conjunto limitado de furos para a amostragem de cada um dos diferentes sistemas aquíferos que integram a bacia baseou-se no seguinte conjunto de critérios ou

variáveis de interesse, que determinou o número de furos por sistema e a sua localização:

- A importância e o uso do recurso (deu-se especial importância a furos de abastecimento das câmaras e outros furos cuja utilização abrangia maior número de pessoas);
- A distribuição espacial uniforme dos furos, por forma a que os resultados a obter não se referissem apenas a uma região particular do sistema aquífero;
- A consideração da heterogeneidade das formações hidrogeológicas de um mesmo sistema aquífero;
- Grau de vulnerabilidade à poluição das formações hidrogeológicas;
- A selecção de áreas onde não existia informação na origem sobre a qualidade das águas subterrâneas;
- A presença de zonas com elevado potencial de poluição, muito especialmente quando associadas a zonas com formações geológicas mais vulneráveis à poluição;
- A necessidade de amostrar os furos com informação sobre as litologias atravessadas e zona de colocação dos ralos.

Na selecção do número de furos por sistema aquífero, procurou-se, em primeiro lugar, dar uma especial atenção ao aspecto da representatividade dos furos seleccionados. Para contribuir para este objectivo caracterizou-se, dentro de um determinado sistema aquífero, a heterogeneidade das formações hidrogeológicas tendo sido atribuída uma maior densidade de furos para as formações mais heterogéneas.

6.1.4.4 Parâmetros Analisados

Os parâmetros químicos analisados para todos os pontos foram designados por programa de base e incluíram os seguintes parâmetros: HCO_3^-; Cl^-; SO_4^{2-}; Ca^{2+}; Na^+; Mg^{2+}; K^+; NO_3^-; NH_4^+; ferro, alcalinidade ($CaCO_3$); coliformes totais e fecais. Foi também efectuada a análise *in situ*, pela equipa do LNEC, de pH, potencial redox, temperatura, oxigénio dissolvido e condutividade eléctrica.

Para além do programa de base foram, ainda, seleccionados um conjunto de parâmetros, nos locais de amostragem onde havia risco de impactes de fontes de poluição identificadas, de acordo com as fontes de risco associadas. Esses parâmetros foram pesticidas e herbicidas (12 pesticidas organofosforados, pesticidas organoclorados, hexaclorobutadieno e bifenilos

policlorados), bário, crómio e fósforo.

6.1.4.5 Descrição da Campanha e das Técnicas de Amostragem

A Campanha LNEC.DH.GIAS de Outubro/Novembro de 1998 foi realizada entre os dias 27 de Outubro e 10 de Novembro de 1998. Foram amostrados 71 pontos representativos dos principais sistemas aquíferos, com base na pré-selecção efectuada em colaboração com o INAG.

A metodologia de amostragem das águas subterrâneas visou a recolha de uma amostra representativa da qualidade da água do furo na origem, para o período de colheita correspondente.

Para cumprir este objectivo a água apenas foi recolhida em furos em funcionamento permanente ou que tinham captado pelo menos nas últimas 24h.

Alguns parâmetros como o pH, o potencial redox, a temperatura, o oxigénio dissolvido e a condutividade eléctrica foram medidos *in situ*, dada a rápida alteração dos seus valores quando em contacto com o ambiente superficial.

Todas as amostras foram conservadas dentro de arcas frigoríficas e entregues ao Laboratório Químico da EPAL, 12h a 24h após a sua colheita. Por este motivo não foram efectuados quaisquer procedimentos tendo em vista a conservação das amostras.

Toda a informação recolhida foi introduzida na base de dados <INVENTAR PBHTEJO.MDB>.

6.1.4.6 Resultados Obtidos

Os resultados obtidos na Campanha LNEC.DH.GIAS de Outubro/Novembro de 1998 foram apresentados em LOBO-FERREIRA *et al.* (1999a) e divulgados na comunicação de LOBO-FERREIRA *et al.* (1999b), à Sessão Pública de Apresentação e Exposição do Plano Nacional da Água e dos Planos de Bacia Hidrográfica, realizada pelo INAG em Lisboa de 9 a 19 de Abril de 1999.

6.2 Dados Quantitativos e Qualitativos de Águas Subterrâneas Portuguesas Disponíveis na Página do INAG na Internet

Um conjunto importante de dados qualitativos e quantitativos sobre águas subterrâneas estão disponíveis, desde 1998, na página do INAG na Internet (*cf.* http://www.inag.pt/snirh), na secção referente ao **Sistema Nacional de Informação sobre Recursos Hídricos** (SNIRH). No Quadro 3.2 apresentam-se os dados disponíveis em Março de 1999.

Quadro 3.2 - Dados hidrogeológicos disponíveis em Março de 1999 na página do Instituto da Água na Internet http://www.inag.pt/snirh

Bacia	Piezometria	Qualidade de águas subterrâneas
Minho	1	0
Vouga/Rib. Costeiras	11	0
Mondego	2	0
Lis/Rib. Costeira	6	0
Ribeiras do Oeste	4	0
Tejo	45	0
Sado	11	0
Guadiana	11	2
Arade	1	0
Algarve	16	11
Total	108	13

Os dados sobre qualidade das águas subterrâneas incluem: alcalinidade, cloretos, condutividade, cor, dureza, bicarbonatos, azoto amoniacal, nitritos, nitratos, oxidabilidade, pH (medido em laboratório), fosfatos e sulfatos.

7. CUSTOS DE MONITORIZAÇÃO

7.1 Estudo Desenvolvido pelo LNEC, WRC, AWW e GEUS para a EC-DGXI

Para se dar uma visão do estudo "*Evaluation of the Costs of Groundwater Inspection in the Member States*", desenvolvido pelo LNEC, WRC, AWW e GEUS para a Comissão Europeia-DGXI, transcreve-se em seguida o texto inicial do *Executive Summary* de LOBO-FERREIRA *et al.* (1996):

The Council of Ministers has recognised the special significance of groundwater in the water cycle and has recommended a detailed action programme to be drawn up for the protection and management of groundwater and a revision of Council Directive 80/68/EEC on the protection of groundwater against pollution caused by certain dangerous substances. The European Commission has identified the need to obtain comparable figures across the Member States of the costs involved in establishing and operating groundwater monitoring networks.

As a result, DGXI has let a contract to a European Team formed by the Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC, Portugal), WRc plc (WRc, United Kingdom), the Austrian Working Group on Waters (AWW, Austria, Umweltbundesamt Wien, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Bundesamt für Wasserwirtschaft), and the Geological Survey of Denmark and Greenland (GEUS, Denmark), to estimate these costs. The main objectives of this study were as follows:

1. To provide cost estimates of existing networks for groundwater monitoring;

2. To provide cost estimates of establishing new monitoring networks; and

3. To provide cost estimates of including new parameters in existing systems.

Three questionnaires on "Groundwater Quantity Monitoring", "and on "Quality Monitoring for Drinking Water Sources and Resources" and "Potential Pollution Sources" were prepared for this project. Institutions involved in groundwater monitoring, in each Member State, were contacted.

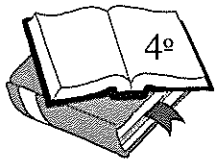
7.2 Custos de Monitorização em Portugal

Em relação à monitorização das águas subterrâneas em Portugal, apresentou-se no Relatório LOBO-FERREIRA *et al.* (1996), intitulado "*Evaluation of the Costs of Groundwater Inspection in the Member States*", uma selecção de valores e custos para os aquíferos da Região de Lisboa e Vale do Tejo (que se designaram por Portugal*1*) e da Região Centro (que se designaram por Portugal*2*).

De acordo com os resultados dos inquéritos recebidos no LNEC, sumarizaram-se também (1) as entidades nacionais responsáveis pela monitorização quantitativa e qualitativa das águas subterrâneas, (2) os dados recolhidos sobre redes de quantidade, redes de qualidade e custos médios anuais de monitorização, (3) os custos estimados para perfuração, colocação de

revestimentos, custos unitários e custos para a implementação de redes adicionais, e (4) os custos estimados com a realização de novas análises, conforme a nova Directiva-Quadro de águas de abastecimento.

CAPÍTULO QUARTO



PROTECÇÃO E REABILITAÇÃO DE AQUÍFEROS

Resumo do Capítulo

Visando contribuir para uma melhor protecção e reabilitação dos recursos hídricos subterrâneos nacionais (na origem), expõem-se, neste Capítulo Quarto, os aspectos mais relevantes a considerar para a protecção de captações subterrâneas e as principais tecnologias disponíveis para a contenção da poluição e para a reabilitação de aquíferos poluídos. Os estudos de base foram desenvolvidos por LEITÃO (1997), LEITÃO e LOBO-FERREIRA (1996) e LOBO-FERREIRA e CIABATTI (1996).

A elaboração desses estudos foi suportada pelos Projectos de Investigação Programada do Laboratório Nacional de Engenharia Civil intitulados "Metodologias para Recuperação de Águas Subterrâneas e dos Solos Contaminados", Proc. 067/12/10664, desenvolvido no LNEC.DH.GIAS, de 1992 a 1996, e "Preservação e Reabilitação da Qualidade das Águas Subterrâneas", Proc. 607/11/13098, em desenvolvimento no LNEC.DH.GIAS de 1996 a Dezembro de 1999.

PROTECÇÃO E REABILITAÇÃO DE AQUÍFEROS

1. INTRODUÇÃO

Visando contribuir para uma melhor protecção e reabilitação dos recursos hídricos subterrâneos nacionais (na origem), expõem-se, neste Capítulo Quarto, os aspectos mais relevantes a considerar para a protecção de captações subterrâneas e as principais tecnologias disponíveis para a contenção da poluição e para a reabilitação de aquíferos poluídos. Os estudos de base foram desenvolvidos por LEITÃO (1997), LEITÃO e LOBO-FERREIRA (1996) e LOBO-FERREIRA e CIABATTI (1996).

A elaboração desses estudos foi suportada pelos Projectos de Investigação Programada do Laboratório Nacional de Engenharia Civil intitulados "Metodologias para Recuperação de Águas Subterrâneas e dos Solos Contaminados", Proc. 067/12/10664, desenvolvido no LNEC.DH.GIAS, de 1992 a 1996, e "Preservação e Reabilitação da Qualidade das Águas Subterrâneas", Proc. 607/11/13098, em desenvolvimento no LNEC.DH.GIAS de 1996 a Dezembro de 1999.

A extensão mundial dos problemas de poluição dos recursos hídricos subterrâneos tornou imperativa uma tomada de atitude no sentido de inverter as actuais tendências negativas detectadas e de reabilitar os recursos já afectados, através da implementação de medidas de planeamento e de gestão integrada dos recursos hídricos.

A protecção dos recursos hídricos subterrâneos e a prevenção da ocorrência de fenómenos futuros de poluição é um passo vital para a utilização sustentável deste recurso. A implementação de estratégias nesse sentido deve basear-se no planeamento dos recursos disponíveis, nomeadamente através da caracterização da vulnerabilidade dos aquíferos à poluição, na definição de perímetros de protecção das captações e na salvaguarda das áreas de recarga.

Pese embora o lugar de destaque e de prioridade que as acções e estratégias de preservação dos recursos hídricos subterrâneos merecem, o actual estado de degradação de alguns destes

recursos impõe a necessidade de se proceder também a acções de reabilitação. Este tipo de acções deveria idealmente ser efectuado num curto prazo após a detecção da poluição, por forma a evitar tempos de operação mais longos e onerosos.

2. PROTECÇÃO DE AQUÍFEROS

2.1 Considerações Gerais

O objectivo do estudo apresentado em CIABATTI e LOBO-FERREIRA (1994), base da síntese que se apresenta neste capítulo, foi a análise e comparação de metodologias de protecção geográfica de captações de águas subterrâneas, visando a elaboração de uma nova norma portuguesa que possa vir a substituir a Norma Portuguesa Definitiva Nº 836 sobre zonamento para a protecção das captações.

De acordo com LOBO-FERREIRA e OLIVEIRA (1993), as águas subterrâneas contribuíam com cerca de 73,3% para o volume total dos recursos hídricos utilizados para fins domésticos, industriais e agrícolas em Portugal Continental, em finais da década de 1980. Com base nas respostas recebidas de quase todas as autarquias do País, referentes a um inquérito lançado em 1997 pela Associação Portuguesa dos Distribuidores de Água (APDA), esse valor passou a ser, em 1997, de 51%.

As reservas hídricas subterrâneas constituem assim um recurso estratégico, cuja gestão e protecção, tanto a nível quantitativo como qualitativo, devem merecer uma acrescida atenção por parte das entidades nacionais e regionais competentes.

O poder autodepurador dos aquíferos garante, na maioria dos casos, uma boa protecção das águas subterrâneas relativamente aos poluentes mais usuais, naturais ou antropogénicos, presentes no solo em baixas concentrações. A vulnerabilidade das águas subterrâneas à poluição aumenta, no entanto, em todas as áreas cujas características topográficas, geológicas e hidrogeológicas sejam menos favoráveis à sua protecção (*cf.* Capítulo Segundo e LOBO-FERREIRA e OLIVEIRA, 1993).

A protecção das captações, que se considera como uma ferramenta essencial da gestão do território, tem como principal objectivo a prevenção da contaminação dos recursos hídricos subterrâneos. Permite alcançar dois objectivos de importância fundamental: (1) assegurar a

disponibilidade de um recurso caracterizado por um notável nível qualitativo e (2) economizar recursos financeiros significativos para utilização noutros campos de utilidade pública.

A nível da União Europeia, a maioria dos Estados-membros elaborou normas que definem as áreas a proteger em torno das captações de águas subterrâneas, tendo como objectivo a manutenção da qualidade das águas captadas.

Em Portugal, embora a mais recente produção legislativa (D.L. n.º 45/94 e 46/94 de 22 de Fevereiro de 1994) tenha mais uma vez evidenciado a importância das zonas de protecção como instrumento de protecção da qualidade das águas captadas, a definição da dimensão dessas zonas continua restrita à Norma Portuguesa Definitiva n.º 836, que remonta a 1971. Nessa norma, a delimitação das zonas de protecção é encarada de uma forma científica incipiente. Além disso, a aplicação da Norma é a excepção em Portugal. De facto, segundo BICUDO *et al.* (1993), em 1989 cerca de 64% dos furos utilizados para abastecimento público não tinham ainda sido submetidos à definição das áreas de protecção da NP 836.

2.2 Conceito de Zona de Protecção de Captações de Águas Subterrâneas

Em WDEQ (1997) faz-se referência à legislação americana "*Safe Drinking Water Act Amendments*" de 1986, em cuja sub-secção 1428(e) se encontra a seguinte definição de zona de protecção de uma captação de água subterrânea:

"*a área de superfície e subsuperfície que circunda uma captação ou conjunto de captações, abastecendo um sistema de abastecimento público, através da qual os contaminantes se deslocam até atingir essa captação de água ou conjunto de captações*".

Também nesse documento se estabelecem os requisitos necessários para a determinação dessas zonas de protecção (subsecção 1428(a)(2)):

"*para cada captação, determinar a zona de protecção como anteriormente definido na subsecção (e) com base em toda a informação hidrogeológica disponível relativamente ao fluxo de água subterrânea, recarga e descarga e outra informação que se pense ser necessária para determinar adequadamente a zona de protecção da captação de água subterrânea*".

2.3 Legislação Nacional sobre Zonas de Protecção das Captações de Água Subterrânea

Em Portugal, a definição das dimensões dos perímetros de protecção das captações de águas subterrâneas é apresentada na Norma Portuguesa Definitiva NP 836 datada de 1971, conforme foi anteriormente referido.

Nesta norma são definidas 2 zonas (cf. Quadro 4.1): de protecção ***próxima*** e de protecção ***à distância***, cuja extensão corresponde a uma área circular em torno da captação e cujo raio é função da permeabilidade e da capacidade de filtração do terreno (CIABATTI e LOBO-FERREIRA, 1994):

Quadro 4.1 - Perímetros de protecção de captações de águas subterrâneas estabelecidos na NP 836

Norma Portuguesa Definitiva NP 836	Raio da zona de protecção próxima (m)	Raio da zona de protecção à distância (m)
Terrenos permeáveis que não asseguram boas condições de filtração	**20 - 50**	**100 – 200**
Terrenos permeáveis que asseguram boas condições de filtração	**10 - 20**	**50 – 100**
Aquíferos confinados protegidos por um horizonte impermeável com um raio de, pelo menos, 50 metros	**5 - 10**	**20**

A NP 836 especifica também o tipo de actividades e estruturas que não deverão ser implantadas no interior de cada zona de protecção.

Infelizmente, a NP 836 não foi elaborada com carácter obrigatório encontrando-se, neste momento, bastante desactualizada (MONTEIRO *et al.*, 1998).

2.4 Critérios e Métodos para a Definição de Zonas de Protecção de Captações de Águas Subterrâneas

De acordo com CIABATTI e LOBO-FERREIRA (1994) é possível distinguir dois tipos de critérios utilizados para definir os perímetros de protecção:

- CRITÉRIO GEOMÉTRICO - utilizado na NP 836 embora com pouco sentido em termos hidrodinâmicos e de se poder tornar dispendioso no caso de uma avaliação incorrecta das dimensões da área;

- CRITÉRIO TEMPORAL – as zonas de protecção são definidas em torno da captação com base em linhas isócronas que permitem estimar o tempo de residência dos contaminantes no aquífero e o tempo necessário para que estes atinjam a captação; neste critério são portanto consideradas as características hidrodinâmicas dos aquíferos e do ponto de emissão dos poluentes, tornando-o preferível relativamente ao critério anterior.

No primeiro caso, as zonas de protecção estão delimitadas pela circunferência de raio correspondente ao valor imposto pela norma. No segundo caso, a configuração da zona de protecção é irregular em termos de configuração uma vez que se encontra delimitada por uma isócrona, *i.e* por uma isolinha de igual tempo de percurso no meio subterrâneo.

De acordo com WDEQ (1997) as zonas de protecção a definir em torno de uma captação deverão ser basicamente as seguintes:

- **Zona 1** – Zona interior de prevenção de acidentes ou zona de protecção sanitária tratando-se de uma área altamente protegida em torno da captação; as potenciais fontes de contaminação devem ser rigorosamente monitorizadas, controladas ou até excluídas para assegurar a não introdução acidental ou intencional de contaminantes no aquífero.

- **Zona 2** – Zona exterior de atenuação cuja função é a de proteger o aquífero contra a contaminação microbiológica (bactérias, vírus, etc.) com origem numa fonte (*e.g.* fossa séptica) localizada perto da captação; tem uma segunda função de permitir um tempo de resposta suficiente para iniciar uma acção activa de limpeza ou implantação de eventuais planos de emergência.

- **Zona 3** – Zona de acção remediadora que protege a captação de contaminantes químicos; na maioria dos casos engloba grande parte da zona de recarga da captação (ou Zona de Contribuição) e/ou do aquífero; a sua dimensão deve ser a suficiente para que seja possível a detecção e resposta a uma possível libertação de contaminantes, incluindo também o tempo suficiente para desenvolver uma nova fonte de água para consumo humano.

Um dos principais objectivos da delimitação das zonas de protecção é o de proteger a água existente no interior dessas zonas tentando gerir os potenciais riscos de contaminação com

possível origem em fontes potenciais de contaminação localizadas na Zona de Contribuição da captação (toda a área que contribui com água para a captação ou conjunto de captações).

Existem diversos factores que influenciam a exactidão (e validação) da delimitação de uma zona de protecção, nomeadamente, (1) a quantidade de informação disponível relativa ao aquífero e às características da captação, (2) a exactidão da informação e (3) a metodologia, e consequentemente o critério, seleccionada e aplicada nessa delimitação.

De acordo com EPA (1993a e b) os critérios utilizados na delimitação das zonas de protecção podem ser os seguintes:

- Distância à captação - é o modo mais directo de medir a distância desde a captação até ao ponto em questão e é utilizado na protecção microbiológica;
- Rebaixamento em torno da captação - define a distância até à qual a bombagem provoca uma descida no nível freático de um aquífero não confinado ou no nível piezométrico de um aquífero confinado (cone de rebaixamento ou zona de influência); acelera a migração na direcção da captação;
- Tempo de propagação - baseia-se no tempo que a água subterrânea (e os contaminantes) leva a atingir a captação partindo de um determinado ponto. Este critério utiliza a composição química da água e também os isótopos para identificar os padrões e as velocidades de fluxo da água (EPA, 1991);
- Fronteiras do Sistema de Fluxo - utiliza divisões de água subterrânea e também características físicas/hidrogeológicas que controlam o fluxo de água subterrânea;
- Capacidade de Assimilação - associado à capacidade que o aquífero (zona não saturada ou zona saturada) tem em atenuar a concentração dos contaminantes; é uma medida complexa.

Uma vez definidos os critérios, deverão ser seleccionados os métodos a utilizar, o que determinará o tipo e quantidade de dados necessários para executar a delimitação das zonas de protecção. Esses métodos são os seguintes, em ordem crescente de complexidade e custo (EPA, 1993b):

- Raio Fixo Arbitrário
    - Consiste na definição de um círculo com um raio fixo em torno da captação a ser protegida; é utilizado para determinar a Zona 1 (Zona de Prevenção de Acidentes)

para captações implantadas em qualquer tipo de aquífero e de condições de fluxo. Apesar de ser um método simples, rápido e pouco dispendioso, é também o menos seguro e menos robusto visto que não considera as propriedades do aquífero nem as características da captação. Pode, ou não, conferir a protecção adequada podendo resultar em sobre-protecção ou sub-protecção.

- Raio Fixo Calculado
  - Consiste na definição de áreas circulares em torno da captação mas relativamente a um determinado critério de tempo de propagação, *i.e.* são áreas através das quais a água subterrânea (e os contaminantes) se propaga durante um determinado período de tempo; esse tempo de propagação define o raio da área circular. Pode ser utilizado na definição das Zonas 2 e 3. A protecção que se pretende pode não ser alcançada com este método uma vez que, apesar de já considerar algumas características do aquífero, apresenta uma tendência para generalizar, podendo conduzir a erros principalmente quando de trata de um meio geologicamente heterogéneo.
- Formas Variadas Simplificadas
  - Método que gera um conjunto de formas através da utilização de equações analíticas (*e.g.* equação de fluxo uniforme) onde são considerados cenários hidrogeológicos e de bombagem idênticos aos da captação; a forma final é seleccionada depois de serem comparadas as condições hidrogeológicas e de bombagem das diferentes formas com as que se verificam na captação; a sua orientação em torno da captação estará relacionada com os padrões de fluxo de água subterrânea. Resulta melhor em áreas com poucas fronteiras de fluxo e poucas heterogeneidades geológicas.
- Métodos Analíticos
  - São utilizadas equações hidrológicas para modelar o fluxo de água subterrânea e o transporte de poluentes; trata-se de equações simples mas que requerem informação sobre parâmetros hidrogeológicos que se assume serem homogéneos em toda a espessura saturada do aquífero (transmissividade, porosidade, gradiente hidráulico, condutividade hidráulica). É um dos métodos mais utilizados que permite obter um boa exactidão com um custo modesto mas, de qualquer modo, o

facto de admitir uma certa uniformidade das condições hidrogeológicas pode introduzir incertezas.

- Mapeamento Hidrogeológico
  - Identifica características físicas e hidrológicas que controlam o fluxo de água subterrânea no interior de um sistema aquífero.
  - Incluído nesta metodologia encontra-se o Mapeamento do Sistema de Fluxo que permite definir a Zona de Contribuição da captação através da identificação de fronteiras de fluxo.
  - Outra metodologia a considerar diz respeito ao **mapeamento da vulnerabilidade** onde é possível identificar zonas particularmente vulneráveis à contaminação. Do ponto de vista da protecção das captações é mais importante encontrar zonas vulneráveis onde os contaminantes potencialmente libertados à superfície possam ser transportados até à água. Este tipo de mapeamento juntamente com o Mapeamento do Sistema de Fluxo é um excelente método para determinar a susceptibilidade de contaminação de regiões mais específicas existentes no interior das fronteiras de fluxo.
- Modelos Matemáticos de Fluxo e Transporte
  - permitem representar com alguma precisão condições hidrogeológicas complexas e diferentes condições de fronteira e iniciais. Permitem prever a dinâmica associada às zonas de protecção de captações e segundo EPA (1991) a metodologia consiste em modelar inicialmente o sistema de fluxo e depois calcular as trajectórias de fluxo dos contaminantes no interior desse sistema.

O método seleccionado deve estar de acordo com o critério utilizado e a sua escolha deve ser efectuada após considerações técnicas cuidadosas que incluem exactidão, facilidade de aplicação, extensão da utilização, simplicidade dos dados, adequabilidade relativamente à hidrogeologia da área.

O problema da protecção dos **aquíferos confinados** não é referido de modo específico em nenhuma das normas analisadas em CIABATTI e LOBO-FERREIRA (1994). Para tal é apenas prevista a aplicação da metodologia utilizada para os aquíferos freáticos ou, aceite uma redução pura e simples das áreas de protecção. Essa redução é acompanhada por medidas que

proíbem qualquer tipo de actividade susceptível de remover os horizontes impermeáveis sub-superficiais de protecção, não sendo fornecido qualquer critério hidrogeológico para justificar a solução proposta para o problema.

As diversas normas apresentam diferenças relativamente à especificação das actividades proibidas no interior das zonas de protecção. A área imediatamente adjacente ao furo deve ser adquirida pela entidade que faz a sua gestão, e deve ser vedada para evitar a entrada de pessoas estranhas ao serviço e/ou animais. No interior dessa área deve ser proibido qualquer tipo de actividade estranha à gestão da captação. Na zona intermédia são proibidas ou limitadas, com base em considerações de carácter hidrogeológico e político/administrativo: (1) todas as actividades que impliquem a descarga no solo ou no subsolo de águas usadas e/ou substâncias perigosas para o aquífero; (2) a realização de novas construções; (3) a realização de descargas; (4) a utilização de adubos e herbicidas; (5) a pastagem de animais; (6) a realização de novas estradas; e (7) o transporte e armazenamento de carburantes e de produtos químicos e radioactivos. Na zona de protecção correspondente à área de recarga do furo as obrigações são menos rígidas. No entanto, pratica-se um certo controlo sobre a ocupação do território.

2.5 Contributos Experimentais para uma nova Legislação Nacional sobre Protecção de Captações de Águas Subterrâneas

Algumas metodologias de protecção foram aplicadas aos campos de captações de Estarreja e de Valada em CIABATTI e LOBO-FERREIRA (1994), tendo-se usado modelos matemáticos para o cálculo das isócronas consideradas nas diferentes legislações. Da análise dos resultados obtidos salientam-se as seguintes considerações, que poderão ser úteis para a formulação de uma futura norma portuguesa sobre a protecção das captações.

O método de zonamento que garante a melhor protecção dos recursos, para os aquíferos freáticos em meios porosos, baseia-se na definição das três seguintes zonas de protecção em torno das captações:

- zona de protecção ***próxima*** (zona I), com o objectivo de proteger o furo e a zona imediatamente adjacente a ele, relativamente a qualquer tipo de contaminação e interferência;
- zona de protecção ***intermédia*** (zona II), cuja definição tem o objectivo de impedir a contaminação de tipo microbacteriológico das águas captadas;

- zona de protecção ***a distância*** (zona III) que protege a captação de eventuais fontes de poluição de tipo difuso presentes no território. Eventualmente, esta zona poderia ser dividida em duas subzonas (IIIa e IIIb) no caso de aquíferos muito extensos, aplicando diferentes limitações a cada uma, relativamente à ocupação do solo.

1. Para a definição da zona II e da eventual zona IIIa, o critério temporal é considerado o mais adequado, porque permite avaliar o tempo de residência dos contaminantes no aquífero e o tempo de chegada às captações, em função das características hidrodinâmicas do aquífero e do seu ponto de emissão no aquífero. O critério geométrico, pelo contrário, pode levar a uma estimativa errada da dimensão das zonas de protecção, implicando uma diminuição do grau de protecção associado e podendo apresentar custos muito elevados na implementação dessas zonas. Na prática, esse critério implica a definição de zonas demasiado grandes, a jusante das captações, e de zonas demasiado pequenas, a montante. De um modo geral, o critério geométrico é desaconselhado, para a definição da zona II (ou eventual zona IIIa), em áreas caracterizadas por um elevado gradiente hidráulico regional.

2. Para a definição da zona I e da zona III (ou eventual zona IIIb), o critério geométrico é preferível pelas seguintes razões:

- relativamente à zona I, a piezometria dinâmica não influencia o limite da zona, mesmo no caso de um gradiente hidráulico regional muito elevado;
- a zona III (ou eventual zona IIIb) representa (segundo uma abordagem ao problema da protecção dos recursos subterrâneos tipicamente representado pela Alemanha) uma área cuja função é a de proteger o aquífero em geral, independentemente do modo e da rapidez com que uma eventual pluma contaminante atinge as captações a partir de diferentes pontos de emissão no aquífero.

3. Para a zona I, torna-se oportuno definir uma extensão correspondente a uma área circular de raio situado entre 10 e 50 metros. Excepcionalmente, com base nas considerações referentes à ocupação do território em áreas densamente urbanizadas e num parecer técnico favorável, a dimensão dessa área poderá ser reduzida.

4. Para a definição da zona II pode-se considerar suficiente a definição da **isócrona de 50 dias**. A adopção da isócrona de 60 dias para a definição da zona II, não implicando um aumento excessivo das obrigações impostas ao território, assegura um grau mais elevado de protecção das águas captadas relativamente aos agentes patogénicos de origem orgânica.

5. Para a delimitação da extensão da zona III, tendo em conta as alíneas a) e b), é oportuno definir dois tipos de zonamento, um relativo a aquíferos de grande extensão e outro relativo a aquíferos de dimensão mais limitada:

- para os aquíferos de grande extensão pode ser identificada uma zona IIIa, cuja extensão corresponde à área delimitada pela isócrona de 365 dias, e uma zona IIIb, correspondente a toda a área de recarga do aquífero;
- para os aquíferos de extensão limitada, é definida apenas uma zona III, correspondente à área de recarga das captações.

6. A definição das restrições a impor à utilização do território no interior das zonas de protecção, é um problema que apresenta notáveis dificuldades de carácter político /administrativo. Trata-se da escolha da filosofia a adoptar na protecção dos recursos hídricos subterrâneos à escala local. As abordagens possíveis são as seguintes:

- padrões qualitativos elevados a conseguir para os recursos hídricos subterrâneos, se necessário, com a aplicação de restrições severas à utilização do território e às actividades socio/económicas que nele se realizam. Esta posição é tipicamente adoptada na Alemanha;
- adopção de imposições segundo um critério que tem em conta as exigências de conservação da qualidade das águas subterrâneas e, simultaneamente, de tipo sócio/económico relativas à ocupação do solo.

É evidente que a escolha de uma destas abordagens deverá ser complementada com uma série de medidas colaterais que ajudem à sua implementação prática, incluindo a disponibilização financeira. Com base na experiência disponível na União Europeia, relativamente ao problema da protecção dos recursos hídricos, a primeira abordagem parece ser a mais correcta. Em situações locais particulares, deveria ser prevista uma abordagem menos restritiva para a gestão das zonas de protecção.

Com base no que se acaba de expor, a lista de actividades proibidas no interior das zonas de protecção poderia ser equivalente à existente na República Federal da Alemanha (*cf.* CIABATTI e LOBO-FERREIRA, 1994). Tendo em conta situações locais particulares, deveria ser permitida a adopção de medidas de protecção activa para os aquíferos captados, em vez de se submeter o território a obrigações de difícil aplicação e controlo, caracterizadas por uma relação custo/benefício não sustentável pela comunidade local/regional envolvente. Essas medidas deveriam ser representadas pela:

- implementação de redes de monitorização do aquífero, com piezómetros localizados no interior e imediatamente a montante da isócrona de 50 dias, tendo em conta as potenciais fontes de poluição presentes no interior e no exterior adjacente à isócrona;

- realização de depósitos centrais que permitam recolher a água captada, de modo a se conseguir a rápida instalação de um sistema de tratamento no caso de confirmada uma situação de contaminação.

7. Para a definição das áreas de protecção é aconselhada a adopção de técnicas de simulação baseadas na utilização de modelos numéricos de escoamento de águas subterrâneas e de transporte de poluentes em aquíferos. A utilização de um modelo matemático permite o estudo detalhado do campo de fluxo nas proximidades das captações, constituindo um instrumento de investigação extremamente potente, versátil e seguro (se utilizado por um especialista), para a avaliação do nível de protecção de um sistema de captações, incluindo a possibilidade de consideração de diferentes cenários. Naturalmente, o grau de segurança que pode ser atingido com a simulação é directamente proporcional à quantidade e à qualidade dos dados hidrogeológicos disponíveis, cuja recolha e elaboração deve ser confiada a um profissional especializado.

8. A implementação prática de uma norma de protecção de captações é extremamente difícil se não for acompanhada de medidas específicas destinadas a:

- garantir um nível de indemnização adequado para os sujeitos forçados a cumprir as obrigações e as medidas restritivas resultantes da adopção das medidas de protecção;
- impor uma política tarifária da água de modo a que o custo da protecção venha a recair sobre os responsáveis pela contaminação e sobre os que beneficiam da protecção, representados em última análise pelos utilizadores;
- evitar o conflito ou a diluição de competências e de responsabilidades na aplicação da norma, entre Ministérios, Comunidades Locais, Entidades Gestoras, etc.;
- garantir a obtenção de um nível de sensibilidade e consenso da opinião pública, relativamente à adopção de programas de protecção dos recursos hídricos subterrâneos e das captações.

9. A definição das áreas de protecção para os aquíferos confinados, em meios porosos, deve ser baseada numa metodologia específica, que deve encarar e individualizar, segundo recomendações da EPA (1993a), uma estratégia de protecção baseada na determinação do grau de confinamento do aquífero captado.

3. REABILITAÇÃO DE AQUÍFEROS

3.1 Considerações Gerais

A reabilitação de águas subterrâneas poluídas pode ser conseguida através de três tipos de acções distintas: (1) a remoção das águas subterrâneas poluídas para posterior tratamento; (2) o tratamento *in situ* para a redução ou eliminação da carga poluente nas águas subterrâneas e (3) a reabilitação de uma área reduzida, em torno do furo de captação, com o objectivo de tratar apenas a água extraída. Neste último caso, as águas subterrâneas são reabilitadas numa zona restrita, necessitando de contínuo tratamento.

Os processos de contenção/reabilitação de aquíferos poluídos podem ser resumidos do seguinte modo: (1) contenção física ou hidráulica da mancha de poluição; (2) extracção das águas subterrâneas poluídas por sistemas de bombagem, para posterior tratamento; (3) tratamento químico *in situ* e (4) tratamento biológico ou bioreabilitação *in situ*.

As metodologias de recuperação *in situ* são, na maioria dos casos, acções conjuntas que integram diversas etapas e, frequentemente, diversas técnicas. Um exemplo do que se acaba de referir passa-se para a maioria dos processos de bioreabilitação que começam pela remoção de solos altamente contaminados, a que se segue um sistema de bombagem para remoção de produtos flutuantes sobre a água, antes de se proceder à bioreabilitação *in situ* para a recuperação das áreas mais poluídas da pluma.

Nas secções seguintes apresenta-se uma síntese da temática contenção/reabilitação de aquíferos, com base nos estudos desenvolvidos por LEITÃO (1997).

3.2 Campo de Aplicação de Técnicas de Reabilitação

Nem em todos os tipos de situações hidrogeológicas é possível proceder à reabilitação *in situ*. Os meios porosos compostos por formações arenosas são os mais adequados a este tipo de processos, na medida em que têm baixos poderes de adsorção e elevados valores de condutividade hidráulica. Estas características permitem o contacto mais fácil e directo entre as soluções introduzidas no meio subterrâneo, para a reabilitação química e/ou biológica e, também, a extracção mais fácil da água poluída, caso se tenha optado por processos físicos de bombagem.

Os aquíferos pouco profundos e onde a superfície freática é elevada são mais favoráveis à utilização de processos de reabilitação, uma vez que permitem um melhor domínio e controlo dos processos em curso, contribuindo, também, para minimizar os custos associados à instalação de furos e à extracção da água ou à introdução de fluidos.

Para cada tipo de técnica está definido um conjunto de limitações à sua aplicação. Estas limitações, desenvolvidas nas secções seguintes, devem ser consideradas aquando da selecção do método de reabilitação mais indicado.

3.3 Etapas do Desenvolvimento de um Plano de Reabilitação

A reabilitação de um aquífero contaminado deve ser iniciada após a eliminação do foco de poluição e após terem sido tomadas medidas para a sua contenção dentro de determinados limites físicos.

O desenvolvimento de um plano de reabilitação de águas subterrâneas implica a definição prévia de um conjunto de quatro aspectos principais: (1) a definição dos objectivos da reabilitação; (2) a determinação dos níveis de qualidade a atingir; (3) a definição dos dados necessários ao desenvolvimento de um plano de reabilitação, finalizando com (4) a selecção da(s) técnica(s) apropriadas.

Os objectivos da reabilitação de águas subterrâneas, isto é, a finalidade da reabilitação, devem ser definidos: se é tratar toda a água poluída do aquífero para lhe conferir características de qualidade semelhantes às requeridas para a água destinada a consumo humano; se é apenas evitar a migração da contaminação para áreas localizadas a jusante; se é um tratamento parcial para retirar apenas, por exemplo, o teor excessivo que apresenta em sais.

3.4 Medidas de Contenção

À detecção de um problema de poluição, como o caso da fuga de uma ou mais substâncias susceptíveis de causar danos ao ambiente, deve suceder um conjunto de medidas de contenção capazes de minimizar a migração dos poluentes para áreas mais afastadas. A contenção evita, assim, a criação de problemas mais vastos, mais complexos e, portanto, de mais morosa resolução.

A protecção das zonas envolventes, não contaminadas, através de medidas de contenção permite que, em alguns casos, a degradação natural atenue a poluição para valores de

concentração aceitáveis. Através de medidas de contenção, os contaminantes não são retirados do local mas é prevenida a sua migração através de barreiras físicas ou hidráulicas.

A contenção da mancha de poluição é conseguida pelos seguintes processos principais: (1) ***hidráulicos***: a extracção e injecção de água em furos (Fig. 4.1) e (2) ***físicos***: a construção de paredes interceptoras e a escavação de drenos.

A utilização de ***processos hidráulicos*** para a contenção de uma mancha de poluição assenta na alteração do regime de circulação da água pela imposição de determinados gradientes hidráulicos, induzidos pela injecção ou bombagem de água do sistema. Os sistemas são concebidos para controlar directamente o movimento da água e, indirectamente, o movimento dos poluentes.

O controlo do regime hidrodinâmico pode ser efectuado a três níveis diferentes: (1) através do rebaixamento da superfície freática, por forma a evitar a circulação de água na zona poluída e a descarga de águas subterrâneas para rios ou lagos; (2) através do confinamento da pluma a uma determinada área, através da extracção de caudais apropriados para o efeito (Fig. 4.1) e (3) através do isolamento hidráulico de uma determinada área por injecção de água (Fig. 4.1).

Os ***processos físicos*** de contenção da poluição baseiam-se na construção de estruturas capazes de constituir um obstáculo artificial ao escoamento natural e, assim, à migração de poluentes, através da intercepção da água de recarga ou da intercepção da circulação de água no sistema.

As principais razões para a utilização exclusiva de medidas de contenção são a: (1) inexistência de uma tecnologia de reabilitação eficaz disponível; (2) presença de poluentes degradáveis cujos teores podem ser atenuados para níveis aceitáveis e (3) presença de poluentes que não são destrutíveis e, portanto, a contenção e a extracção são os únicos métodos disponíveis.

3.4.1 Síntese das Principais Tecnologias

Designam-se por tecnologias físicas de reabilitação os sistemas compostos por uma unidade de extracção de águas subterrâneas poluídas e uma unidade de tratamento das águas. Dentro desta categoria conhecem-se dois tipos principais de sistemas: (1) os sistemas de furos de captação e (2) outros sistemas interceptores, de que são exemplo as valas. A água retirada por este tipo de processos físicos é posteriormente tratada, podendo vir a ser reinjectada no subsolo ou a ser lançada num outro local apropriado. O primeiro tipo de sistema referido é

claramente o mais utilizado, não só dentro da categoria das tecnologias físicas de reabilitação, mas também dentro das tecnologias de reabilitação, em termos globais.

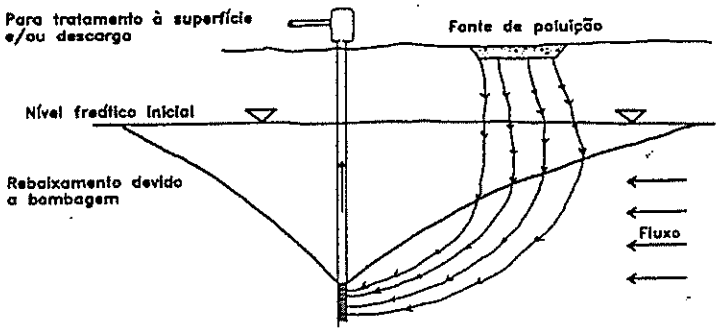
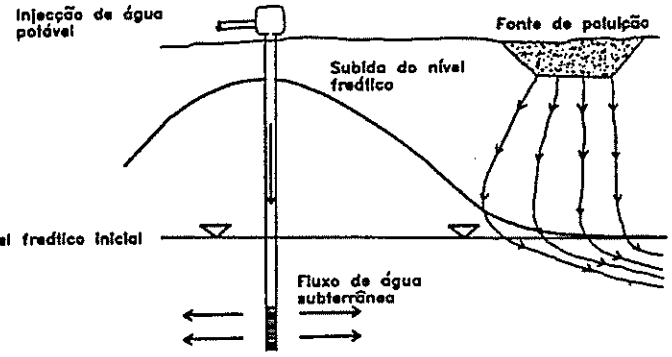


Fig. 4.1 - Esquema de barreiras hidráulicas para contenção da poluição



(Figura extraída de LEITÃO 1997, adaptada de CANTER e KNOX, 1985)

3.5 Tecnologias Físicas de Reabilitação

3.5.1 Considerações Gerais

Os sistemas de furos de captação, designados por sistemas de bombagem e de tratamento (*pump-and-treat* em terminologia anglo-saxónica), têm como objectivo principal o controlo hidráulico de uma massa de água poluída dentro de determinados limites físicos, através da sua extracção em furos, para posterior tratamento (Fig. 4.2).

Neste processo, a reabilitação é conseguida pela drenagem controlada de água limpa através da zona poluída do aquífero. A circulação acelerada de água através da zona poluída do aquífero permite remover os poluentes dissolvidos na água e, mais lentamente, os que se encontram adsorvidos nos solos ou em fases líquidas imiscíveis, desde que se encontrem no

interior da área de influência das captações.

Os cálculos para a determinação do controlo hidrodinâmico das águas subterrâneas poluídas, através de furos, são efectuados com base nos conceitos de hidráulica de poços cujo desenvolvimento pode ser encontrado, por exemplo, em CUSTODIO e LLAMAS (1976) e em LOBO-FERREIRA (1983).

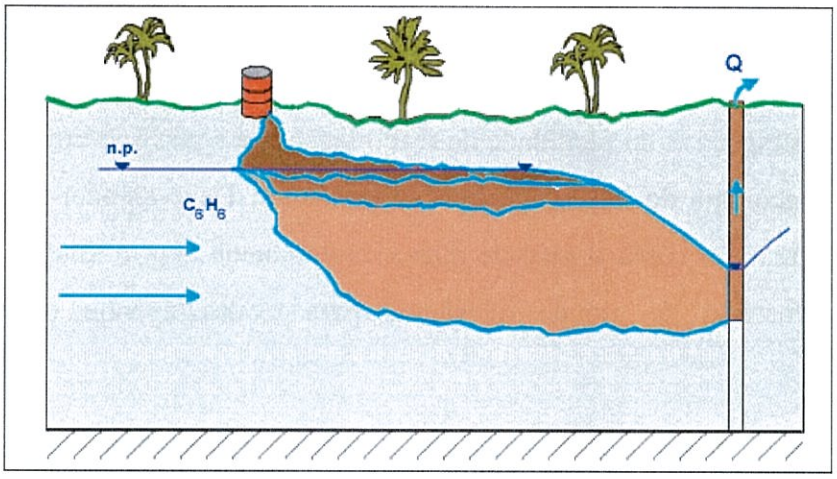


Fig. 4.2 - Exemplo esquemático, em corte vertical, da extracção de uma pluma poluente através de um sistema de bombagem

(Figura adaptada de LEITÃO, 1997)

A aplicação destas tecnologias implica o conhecimento da extensão da massa de água poluída e é apenas possível quando a fonte de contaminação é eliminada, na medida que a entrada em funcionamento das captações induz a alteração do regime de escoamento e, assim, o potencial arraste de poluentes para as zonas mais profundas do subsolo.

3.5.2 Caracterização dos Sistemas de Bombagem e de Tratamento

A caracterização dos sistemas a reabilitar, nomeadamente no que concerne às características hidrogeológicas e hidroquímicas dos aquíferos e às características dos poluentes neles presentes, constituem os dados básicos que permitem analisar a viabilidade de reabilitação e, também, determinar as características do sistema de bombagem e de tratamento mais indicadas para a resolução de um determinado problema. As características principais a determinar são as seguintes: (1) o tipo de furos apropriado; (2) o número e a localização dos furos; (3) o caudal de extracção e (4) o tempo de bombagem necessário para a reabilitação.

Num sistema de bombagem, a colocação dos furos deve ser feita de modo a respeitar três condições básicas (CANTER e KNOX, 1985): (1) a extracção deve ser suficientemente elevada para provocar a formação de linhas de fluxo que envolvam os limites laterais e superiores da mancha de poluição; (2) os furos de captação devem ser colocados a jusante do

limite da pluma por forma a inverter o gradiente hidráulico nesse limite e (3) os rebaixamentos resultantes das extracções de água não devem exceder a espessura saturada do aquífero.

São quatro as metodologias mais utilizadas para a determinação das características óptimas de um sistema de bombagem: (1) extensão de um sistema piloto; (2) aplicação de curvas tipo de zona de captura; (3) modelação por tentativa e erro e (4) modelação por técnicas de simulação/optimização, que são apresentadas no Capítulo Quinto.

O Quadro 4.2 apresenta uma perspectiva da facilidade de reabilitação das águas subterrâneas poluídas, em função da hidrogeologia do local e do tipo de poluentes. Deve atender-se ao facto de que esta análise não tem em conta o total de massa contaminada nem o tempo de contaminação, outros dois factores de grande relevância para o desempenho destas tecnologias.

Os sistemas ideais para este tipo de reabilitação são aqueles em que os contaminantes se encontram dissolvidos na água, onde as formações geológicas locais são relativamente homogéneas, onde a permeabilidade das formações é uniforme e elevada e onde a contaminação é relativamente recente.

A difusão de poluentes de zonas de menor permeabilidade, a desadsorção da poluição e a contaminação com NAPL são três dos principais factores responsáveis por dificultar o sucesso das tecnologias descritas. GRATHWOHL (1998) propõe a aplicação de novos conceitos de tratamento, entre os quais destaca a aplicação de sistemas de "***funnel-and-gate***" e de **barreiras reactivas**. Nestes sistemas os poluentes são removidos na própria pluma sem que haja necessidade de tratamento da água após remoção. A concepção destes sistemas é efectuada com base em parâmetros hidráulicos e hidrogeológicos e podem ser optimizados através da utilização de modelos matemáticos.

3.6 Tecnologias Químicas de Reabilitação *In Situ*

3.6.1 Síntese das Principais Tecnologias

Os processos químicos de reabilitação baseiam-se na utilização de reagentes para destruir ou modificar quimicamente os poluentes presentes nos aquíferos. A introdução dos reagentes no subsolo é usualmente efectuada através de furos.

Quadro 4.2 - Síntese do grau de facilidade de reabilitação de águas subterrâneas poluídas por processos de bombagem e tratamento, em função da hidrogeologia local e do tipo de poluentes (quadro extraído de LEITÃO (1997), adaptado de MACDONALD e KAVANAUGH, 1994)

	Tipo de poluente					
Hidrogeologia	**Móvel, em dissolução (degradável/ volatizável)**	**Móvel, em dissolução**	**Fortemente adsorvido, em dissolução (degradável/ volatizável)**	**Fortemente adsorvido, em dissolução**	**LNAPLs**	**DNAPLs**
Aquífero poroso homogéneo	1	1-2	2	2-3	2-3	3
Aquífero poroso heterogéneo	2	2	3	3	3	4
Aquífero fracturado	3	3	3	3	4	4

Nota: na escala de 1-4 utilizada, 1 e 4 representam, respectivamente, o menor e o maior grau de dificuldade de reabilitação. Esta escala é uma forma subjectiva e flexível de analisar as diferentes hipóteses; outros factores como o tempo de contaminação, a área e o volume poluídos podem interferir de forma significativa nestes dados.
DNAPL ou "dense nonaqueous-phase liquid" = Líquido imiscível na água e mais denso do que a água.
LNAPL ou "light nonaqueous-phase liquid" = Líquido imiscível na água e menos denso que a água.

A reabilitação química *in situ* pode ser conseguida por três vias distintas, em função dos objectivos propostos: (1) ***conversão dos poluentes em subprodutos não perigosos*** (*e.g.* a redução dos bifenilos policlorados, PCBs, em cloreto de sódio, dióxido de carbono e água) ou subprodutos menos perigosos; (2) ***solubilização dos poluentes da matriz sólida para a água***, caso o objectivo seja a utilização conjunta com processos de extracção da água para tratamento, servindo nesse caso os processos químicos para aumentar o desempenho da reabilitação por bombagem de água ou, pelo contrário, (3) ***retenção dos poluentes na matriz porosa***, através da sua transformação em compostos menos móveis, por forma a diminuir, por vezes apenas temporariamente, a concentração de poluentes na água e, assim, permitir a sua extracção em melhores condições de qualidade.

O maior desenvolvimento destas tecnologias é na aplicação conjunta com outros processos, isto é, empregue como pré ou pós-tratamento. Mais raramente é utilizado como um processo isolado, como o caso da precipitação química de metais e outros catiões presentes na água.

A utilização de processos químicos tendo em vista a destruição ou a transformação de poluentes em ***subprodutos menos perigosos*** é, em muitos casos, um processo cujos efeitos a longo prazo, dos reagentes químicos e dos produtos da reacção, não são totalmente conhecidos. A estabilidade dos processos para períodos longos é, assim, ainda incerta (ANDERSON e DEE, 1994). Um outro aspecto que é frequentemente referido com alguma

preocupação é a toxicidade de alguns produtos de reacção gerados durante a reabilitação, em especial os que resultam de reacções de troca iónica.

A utilização de **barreiras activas permeáveis** para o tratamento de águas poluídas por metais em solução tem sofrido um rápido desenvolvimento nos últimos anos. Neste processo, as barreiras compostas por um material permeável e reactivo são colocadas por forma a intersectarem a pluma contaminada. O material reactivo é seleccionado para promover a atenuação dos poluentes através de processos de degradação ou de precipitação/adsorção (BLOWES *et al.*, 1998).

A utilização de processos químicos para a ***solubilização de poluentes da matriz sólida para a água*** visa maximizar a solubilidade dos poluentes, diminuindo assim o seu retardamento e aproximando o seu comportamento de poluentes conservativos. A manipulação dos processos de adsorção/desadsorção é o principal mecanismo utilizado. A utilização conjunta de processos químicos e físicos de reabilitação surgiu da necessidade verificada em melhorar o desempenho dos processos de bombagem e de tratamento onde diversas reacções químicas eram responsáveis pelo prolongado tempo de reabilitação ou, ainda, por aumento da concentração de poluentes na água, após um determinado período de descontaminação.

SABATINI *et al.* (1998) discutem o papel dos surfactantes como, por um lado, estimuladores da solubilização e, por outro, como possíveis estimuladores da mobilização de uma grande variedade de outros poluentes. Com os trabalhos de campo que apresentam, chamam a atenção para a necessidade de conhecer aprofundadamente as propriedades dos surfactantes e os efeitos secundários da sua aplicação.

A reabilitação química *in situ*, tendo por objectivo o tratamento da água antes da sua extracção, consiste, em termos genéricos, na aplicação de agentes químicos de descontaminação, na zona envolvente da área poluída, por forma a neutralizar os efeitos negativos produzidos por determinados poluentes, ao ***reter***, p.e. por precipitação, ***os poluentes na matriz porosa***. Neste tipo de acções, a reabilitação é processada, não pela remoção de poluentes, mas antes pela sua imobilização, transformação ou destruição.

Grande parte das tecnologias de tratamento *in situ* baseiam-se na manipulação das condições químicas por forma a gerar precipitados, uma vez atingido o equilíbrio químico. Os metais pesados, por exemplo, podem precipitar como minerais insolúveis pela adição de sulfuretos ou hidróxidos à água, para condições de pH ligeiramente ácido ou perto da neutralidade

(CRINE, 1993); os cianetos, por seu lado, podem ser destruídos com agentes oxidantes; a precipitação de determinados catiões (Fe e Mn, por exemplo) pode ser conseguida pela entrada de ar no meio subterrâneo, podendo a sua remoção ser ainda conseguida pela adição de determinados aniões que induzam a sua precipitação.

Os processos químicos utilizados na reabilitação de aquíferos poluídos são alguns processos clássicos de tratamento de águas com a diferença que são aplicados no meio subterrâneo. É, por isso, necessário entrar em conta com as características químicas do meio e as consequentes alterações introduzidas no desencadeamento dos processos de reabilitação. Apesar dos processos de tratamento químico poderem potencialmente integrar um conjunto vasto de processos, apenas os processos de desadsorção, oxidação, ionização e precipitação foram aplicados para a reabilitação *in situ*.

Nos processos químicos de reabilitação, a introdução de agentes de descontaminação no meio subterrâneo é mais frequentemente processada através da instalação de um conjunto de furos que injectam o agente de descontaminação na zona montante da pluma de água contaminada; a adição do agente pode igualmente efectuar-se na área interna da pluma contaminada. Para cada tipo de poluente, ou de classes de poluentes, são estudadas as condições capazes de conduzir ao seu tratamento. O tipo de agente é específico para cada classe de poluentes com comportamentos idênticos.

3.6.2 Campo de Aplicação de Tecnologias de Reabilitação Química

O campo de aplicação de tecnologias de reabilitação química *in situ* é vasto, quer em termos do tipo de poluentes quer do meio hidrogeoquímico (Quadro 4.3). Quanto ao tipo de poluentes, podem ser tratadas águas contendo poluentes orgânicos e inorgânicos, em solução na água ou adsorvidos na matriz sólida. Os poluentes imiscíveis na água (NAPLs) não são tratados por processos químicos, mas implicam antes um tratamento hidráulico por processos de bombagem e/ou por bioreabilitação (APPELO e POSTMA, 1993).

O tipo de meio hidrogeoquímico apropriado para a reabilitação química *in situ* depende dos poluentes a tratar. Os meios onde a permeabilidade é mais elevada e as condições litológicas são menos favoráveis à existência de elevadas adsorções, são os mais adequados ao processamento da reabilitação *in situ*.

Quadro 4.3 - Síntese da aplicabilidade das técnicas de reabilitação química para o tratamento *in situ* de águas subterrâneas (extraído de LEITÃO, 1997)

Tipo de poluentes	**Desadsorção**	**Oxidação**	**Precipitação**
Orgânicos voláteis	não adequado	não adequado	não adequado
Orgânicos não-voláteis	adequado*	adequado	não adequado
Inorgânicos	não adequado	não adequado	adequado

*Processo a utilizar conjuntamente com tecnologias de bombagem e de tratamento

O tratamento de águas subterrâneas poluídas com o recurso a tecnologias *in situ*, tanto químicas como biológicas, apenas é possível nos casos em que se conhece o tipo de poluentes existentes e as suas concentrações e extensão na massa de água.

A utilização de tratamento químico deve ser considerada quando uma ou mais das seguintes condições existe (ANDERSON e DEE, 1994): (1) a reabilitação visa apenas a remoção de uma ou algumas espécies químicas de poluentes que podem ser quimicamente modificadas; (2) a quantidade de material a ser tratado é pequena ou a concentração de poluentes é baixa.

3.7 Tecnologias Biológicas de Reabilitação

3.7.1 Considerações Gerais

O princípio básico das tecnologias de degradação biológica *in situ* é a incrementação dos processos microbiológicos de degradação de compostos orgânicos - naturalmente em curso no subsolo - pela estimulação artificial da actividade dos microrganismos aí presentes e da criação das condições necessárias ao seu melhor funcionamento, com o objectivo de diminuir a poluição; algumas biotecnologias consideram também a introdução no subsolo de novos microrganismos aclimatizados.

O objectivo principal da biodegradação é a conversão de poluentes orgânicos em biomassa ou em produtos inofensivos do metabolismo microbiano, como o dióxido de carbono, metano e sais inorgânicos. Para dar início à oxidação dos compostos orgânicos, é necessário que seja fornecido oxigénio ao meio por forma a desencadear uma reacção do tipo da que se apresenta para o benzeno:

$$C_6H_6 + 15/2O_2 \rightarrow 6CO_2 + 3H_2O$$

A redução dos efeitos tóxicos dos poluentes orgânicos é conseguida pela mineralização dos poluentes orgânicos, isto é a sua conversão em dióxido de carbono e água. Contudo, em muitos sistemas não se atinge necessariamente a mineralização de todos os poluentes, mas a remoção dos poluentes mais móveis, incluindo solventes, deixando os de mais baixa solubilidade e de maior peso molecular que são geralmente menos tóxicos.

Ao contrário de diversas tecnologias de descontaminação que transferem resíduos de um local para outro, a biodegradação é uma tecnologia que permite a descontaminação através da destruição parcial ou total dos contaminantes *in situ*.

Um sistema de bioreabilitação *in situ* envolve a estimulação da biodegradação dos contaminantes sem que haja escavação ou extracção do subsolo, através da introdução em furos ou galerias de infiltração de elementos no subsolo. Neste processo, o subsolo do local contaminado é utilizado como um reactor da actividade biológica.

A bioreabilitação depende das condições físicas, químicas e biológicas do subsolo. Deste modo, o sucesso na sua aplicação depende não apenas dos processos de degradação microbiológica, mas também das complexas interacções entre os poluentes, a dinâmica do subsolo e a população microbiológica presente.

3.7.2 Campo de Aplicação

As tecnologias de biodegradação *in situ* são essencialmente utilizadas para a descontaminação de aquíferos poluídos por compostos orgânicos. Porém, em alguns casos, podem desenvolver-se sistemas para permitir também a remoção de outros elementos dissolvidos na água por processos de precipitação, como é o caso do ferro e do manganés.

3.7.3 Requisitos para a Aplicação

As condições necessárias à actividade microbiológica no subsolo relacionam-se com cinco parâmetros principais: a presença de microrganismos adequados, o potencial redox, o pH, a presença dos adequados aceitadores de electrões, a permeabilidade do meio e a presença de um substrato mínimo.

Em geral, a presença de um elevado e diversificado número de microrganismos no subsolo (até cerca de 10^6 organismos/g de solo seco, WILSON *et al.*, 1986) torna, para a maioria das situações, esta condição satisfeita à partida.

O pH pode afectar a adsorção de compostos ionizáveis e limitar o tipo de microrganismos existentes no subsolo (STAPS, 1991). As condições de potencial redox e de pH devem estar dentro de intervalos específicos que permitam, por um lado o crescimento das bactérias e, por outro lado, a não acomodação de agentes inibidores, como por exemplo os metais pesados, em concentrações tóxicas. A maioria das bactérias do subsolo preferem valores de pH entre 6,5 e 8, apesar de se poderem adaptar a condições ligeiramente diferentes destes limites (BARBEE, 1994).

A presença de oxigénio ou de outros aceitadores de electrões é essencial para que se processe a biodegradação dos poluentes orgânicos. Os principais são o ar, o oxigénio, o peróxido de hidrogénio e o nitrato. As concentrações indicadas para a biodegradação dependem do poluente e do meio em que se insere.

No que diz respeito às condições geológicas do meio, a permeabilidade é o parâmetro de maior relevância para o sucesso de um tratamento por biorecuperação *in situ*. A sua importância deve-se à necessidade de circulação dos diversos intervenientes - nutrientes, água, oxigénio e microrganismos - no processo de biodegradação no subsolo.

Quanto à gama de variação dos valores de permeabilidade são, em geral, admitidos valores entre 10^{-2} e 10^{-5} m/s; materiais com permeabilidades inferiores podem reter quantidades significativas de contaminantes, mas estão pouco em contacto com a solução injectada, pelo que dificilmente os degradam. Aplicações com melhores resultados são conseguidas em formações essencialmente arenosas ou em aquíferos muito fracturados, onde a permeabilidade é maior. Quando o sistema considera a circulação de ar, a permeabilidade deverá ser superior a 10^{-8} m/s (KIRKPATRICK e MCKEE, 1993).

Outra importante questão para a biodegradação é a existência de uma concentração de substrato mínimo, isto é um substrato que permita a extracção da energia necessária à manutenção da actividade biológica dos organismos responsáveis pelo processo de biodegradação. A presença de uma concentração de substrato abaixo dos valores mínimos exigidos pode provocar um significativo decréscimo da população e, consequentemente, da eficácia da bioreabilitação.

3.7.4 Síntese das Principais Tecnologias

3.7.4.1 Bioreabilitação por Processos de Circulação de Fluidos

O princípio das tecnologias de bioreabilitação *in situ* que utilizam processos de circulação de fluidos é, através da introdução no sistema de elementos com determinadas características e composições, incrementar o desenvolvimento dos microrganismos responsáveis pela biodegradação de poluentes. Este tipo de processos permite a reabilitação de aquíferos poluídos em hidrocarbonetos quer estes estejam dissolvidos na água ou adsorvidos na matriz porosa.

Em geral, um sistema de bioreabilitação *in situ* por processos de circulação tem uma configuração de sistema semi-fechado de forma a que o local contaminado é isolado e controlado; a água subterrânea não poluída pode entrar no local contaminado mas a água subterrânea contaminada não se pode deslocar para as áreas não poluídas. O local pode ser isolado por tecnologias hidráulicas ou pode ser isolado com recursos a técnicas de engenharia. Mais frequentemente, é utilizado um sistema hidráulico onde a água é rebaixada na zona central, tratada e de novo injectada em diversos pontos da periferia do local. A água é extraída geralmente em maior proporção relativamente à que é injectada; o excedente é geralmente lançado numa conduta de águas residuais.

São diversos os processos utilizados para a introdução artificial dos elementos necessários à degradação aeróbia de compostos orgânicos num aquífero poluído: (1) através de furos de injecção que permitem a recirculação de oxigénio e de nutrientes na zona saturada (Fig. 4.3); (2) através de galerias de infiltração que permitem o tratamento simultâneo da zona vadosa (Fig. 4.4) e (3) através de sistemas de aplicação de superfície que também podem ser utilizados para a circulação de água de melhor qualidade através da zona vadosa do solo.

Os microrganismos aeróbios permitem degradar uma vasta gama de contaminantes orgânicos, tendo um vasto campo de aplicação. Os exemplos mais frequentes incluem o benzeno, o tolueno, os xilenos e outros alcalibenzenos, cuja principal origem se deve a infiltrações em áreas de serviço de abastecimento de combustível. O naftaleno, o metilnaftaleno, os fluorenos, o dibenzofureno e uma variedade de outros hidrocarbonetos aromáticos polinucleares provenientes de derrames de diesel ou óleo quente; acetona, isopropanol, metanol, etanol e t-butanol de derrames de solventes e de gasolina e diversos compostos de fenóis e compostos

heterocíclicos encontrados nas águas residuais de diversas indústrias.

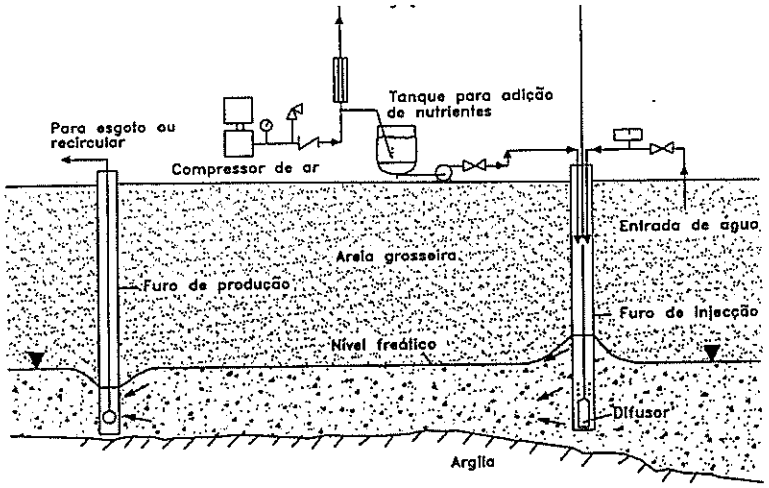


Fig. 4.3 - Representação de um processo de bioreabilitação aeróbia

(Figura extraída de LEITÃO 1997, adaptada de LEE *et al.*, 1988)

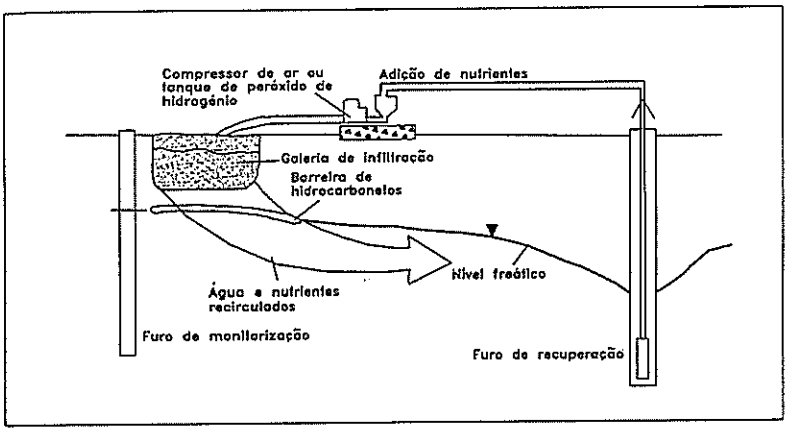


Fig. 4.4 - Representação de uma galeria de infiltração para recirculação de água e de nutrientes

(Figura extraída de LEITÃO 1997, adaptada de LEE *et al.*, 1988)

3.7.4.2 Bioreabilitação por Processos de Injecção de Ar

Estas tecnologias diferem dos sistemas de circulação anteriormente descritos pelo tipo de método empregue. Existem dois processos principais de introdução de ar no sistema: (1) na zona vadosa, por um processo de ventilação visando a biodegradação (***bioventing***, em terminologia anglo-saxónica) (Fig. 4.5) e (2) na zona saturada, por um processo de introdução directa *in situ* de ar na água (***biosparging***, em terminologia anglo-saxónica) (Fig. 4.6).

Apesar das tecnologias de injecção de fluidos e de ar diferirem radicalmente, os processos microbiológicos que ocorrem no subsolo são essencialmente os mesmos: a incrementação dos processos de biodegradação pelos microrganismos nativos pelo aumento de oxigénio no meio.

O ***Bioventing*** visa incrementar a biodegradação de contaminantes orgânicos presentes na zona vadosa, através da introdução de ar na zona acima da superfície saturada, de modo a provocar o movimento forçado do ar através do meio (Fig. 4.5).

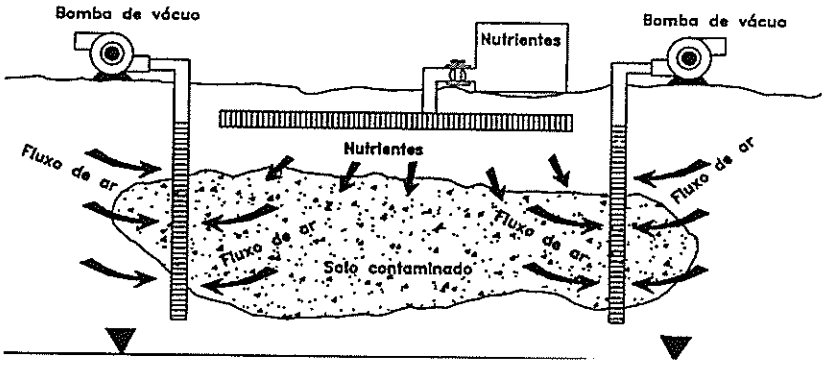


Fig. 4.5 - Biodegradação de contaminantes orgânicos da zona vadosa através da introdução de ar na zona acima da superfície saturada - bioventing

(Figura extraída de LEITÃO 1997, adaptada de MACDONALD e RITTMANN, 1993)

Neste processo são maximizadas as reacções de biodegradação dos compostos degradáveis em condições aeróbias, independentemente do seu peso molecular, e minimizados os processos de volatilização.

Um sistema de ventilação da zona vadosa visando a bioreabilitação é composto por um conjunto de indutores do ar (influentes) e de furos efluentes (LEE e SWINDOLL, 1993). A localização dos furos depende das condições do local.

Este tipo de tecnologia pode ainda ser aplicada à zona habitualmente saturada de duas formas distintas: (1) através do rebaixamento induzido do nível piezométrico e da posterior injecção de ar e (2) através da injecção forçada de ar no subsolo por forma a provocar a deslocação da superfície piezométrica (LEE e SWINDOLL, 1993).

Os resultados para uma melhor biodegradação podem ser maximizados utilizando baixos fluxos de ar, maiores áreas de escoamento e optimizando as condições para o crescimento de microrganismos através da adição de nutrientes inorgânicos (LEE e SWINDOLL, 1993). Durante este processo é necessário manter as condições óptimas para maximizar a biodegradação e não a volatilização.

O campo de aplicação das tecnologias de ventilação visando a bioreabilitação é a zona vadosa.

Os principais tipos de poluentes que têm sido reabilitados são diversos tipos de gasolina, diesel e óleos (LEE e SWINDOLL, 1993). Os graus de degradação para diversos hidrocarbonetos em 28 locais variam de 480 a 7300 mg/kg solo/ano, para áreas de tratamento entre 6 - 18 m (FREDRICKSON *et al.*, 1993).

O método de injecção de ar na zona saturada (***biosparging***) tem por objectivo remover os contaminantes orgânicos, através de uma combinação de processos de volatilização e de

biodegradação (Fig. 4.6). A introdução do ar é efectuada em furos colocados um pouco abaixo da superfície saturada, por forma a provocar a dispersão lateral do ar a partir dos furos. O caudal a injectar varia de alguns a vários m^3/h, por furo. À medida que o ar ascende no seio da coluna de água, alguns contaminantes são volatilizados e escapam para a zona vadosa. Ao mesmo tempo, o oxigénio do ar serve para estimular a degradação aeróbia dos poluentes (JOHNSON *et al.*, 1993).

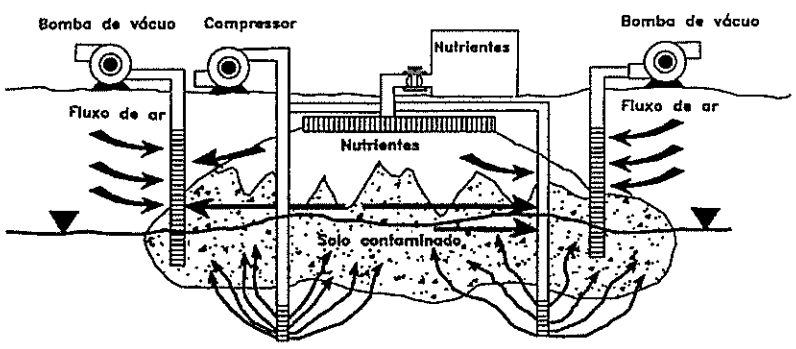


Fig. 4.6 - Biodegradação de contaminantes orgânicos por sistemas de injecção de ar na zona saturada - biosparging

(Figura extraída de LEITÃO 1997, adaptada de MACDONALD e RITTMANN, 1993)

Esta técnica permite remover os voláteis e os hidrocarbonetos biodegradáveis em condições aeróbias, quer na zona saturada quer na zona vadosa. Os contaminantes que se pretende degradar podem encontrar-se dissolvidos nas águas subterrâneas, estar adsorvidos no solo ou ocorrer como líquidos menos densos que a água e imiscíveis (NAPLs) (JOHNSON *et al.*, 1993).

Os furos de injecção de ar utilizados neste tipo de método devem ter a zona dos ralos inteiramente localizada na zona saturada.

O campo de aplicação desta tecnologia é na remoção de compostos orgânicos voláteis e/ou hidrocarbonetos biodegradáveis em condições aeróbias, presentes nas zonas saturada e vadosa. A sua utilização para a reabilitação de locais contaminados por gasolinas e solventes clorados é também possível.

A ventilação da zona vadosa para a biodegradação (*bioventing*) **é presentemente uma tecnologia bem estabelecida e de sucesso.** Por contraste, **a introdução directa de ar na zona saturada é, ainda, uma tecnologia muito recente e em fase de ensaio** (JOHNSON *et al.*, 1993).

3.7.4.3 Bioreabilitação por Alternância Cíclica da Superfície Piezométrica

O movimento cíclico vertical da superfície piezométrica é um processo que surge associado às metodologias de introdução de nutrientes e de oxigénio previamente descritas e que visa incrementar a biodegradação aeróbia de poluentes. A sua aplicação implica a combinação com outras tecnologias, como sistemas de injecção de ar.

O princípio desta metodologia é a movimentação cíclica da superfície piezométrica através da injecção de ar ou de água na zona contaminada, por forma a provocar, através do movimento vertical da água, a exposição alternada dos microrganismos na zona contaminada, à humidade - quando a superfície piezométrica está empolada - e ao ar - quando a superfície piezométrica está deprimida e os poros contêm algum ar.

Esta tecnologia pode ser aplicada em casos de poluição por líquidos menos densos do que a água, aerobiamente degradáveis, como as gasolinas e o diesel, que existam como uma camada contínua de líquido sobre a superfície piezométrica ou como um líquido residual presente na zona vadosa.

3.7.4.4 Bioreabilitação por Introdução de Microrganismos Aclimatizados

A bioreabilitação pela introdução de microrganismos aclimatizados (*bioremediation by addition of acclimated microorganisms* ou *inoculation* ou *bioaugmentation*) baseia-se em processos desencadeados por organismos alóctones e não por processos de estimulação do incremento do crescimento da população autóctone, descritos até aqui.

A capacidade de degradação das numerosas comunidades de microrganismos é muito vasta e, quando as condições são favoráveis, a maioria dos compostos orgânicos pode ser rapidamente destruída. Não obstante, muitos compostos sintéticos persistem por algum tempo no mesmo local, mesmo sendo biodegradáveis. Nesses casos e nos casos de ambientes onde estejam ausentes as bactérias apropriadas à degradação de determinado composto, a hipótese de adicionar novos organismos aclimatizados pode incrementar significativamente a decomposição desses compostos.

O sucesso deste tipo de metodologias depende de três factores principais (WILSON *et al.*, 1986): (1) a capacidade de sobrevivência e de competição dos novos microrganismos com os microrganismos nativos para a utilização de nutrientes; (2) a capacidade de migração dos microrganismos desde o ponto de injecção até ao local onde se pretende efectuar a

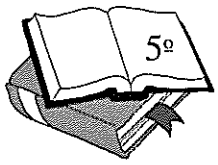
biodegradação e (3) a capacidade dos microrganismos adicionados em manter a selectividade para metabolizar os compostos para que foram inicialmente adaptados.

4. CONCLUSÕES

A tomada de consciência da deterioração da qualidade das águas subterrâneas e da sua sobreexploração torna necessária a adopção de novas medidas de gestão, de protecção e de reabilitação deste recurso, no quadro de um desenvolvimento sustentável.

A aplicação de tecnologias de contenção/reabilitação da poluição *in situ* é muito promissora, nomeadamente por apresentar as seguintes vantagens: (1) as associadas ao facto de não haver necessidade de remoção e de transporte de águas e/ou de solos para tratamento num outro local e (2) as traduzidas pela aceleração dos processos de descontaminação relativamente às técnicas que consideram isoladamente a remoção para tratamento.

CAPÍTULO QUINTO



GESTÃO OPTIMIZADA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. UMA ANÁLISE DA LITERATURA INTERNACIONAL

Resumo do Capítulo

Neste capítulo desenvolve-se o tema da gestão optimizada de aquíferos. O estudo de base inseriu-se no Projecto de Investigação Programada do Laboratório Nacional de Engenharia Civil intitulado "Gestão Optimizada de Aquíferos", Proc. 607/11/13098, em curso em 1999 no LNEC.DH.GIAS. Visou-se o desenvolvimento de metodologias apropriadas para avaliação e

exploração optimizada de recursos hídricos subterrâneos. O projecto contou, em 1996 e 1997, com o apoio financeiro da Comissão Europeia, materializado numa bolsa de investigação TECHWARE atribuída no âmbito do programa Leonardo da Vinci (DGXII).

O capítulo foi dividido em duas partes. Na Parte I apresentam-se conceitos básicos da gestão de águas subterrâneas, aprofundando-se o enquadramento conceptual "simulação-optimização".

Na Parte II do capítulo, como resultado da pesquisa bibliográfica desenvolvida, apresenta-se o estado-da-arte da simulação/optimização para o planeamento e a gestão do abastecimento por águas subterrâneas, tendo-se focado em especial a modelação que integra a componente qualidade das águas subterrâneas.

GESTÃO OPTIMIZADA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.
UMA ANÁLISE DA LITERATURA INTERNACIONAL

PARTE I : INTRODUÇÃO

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento deste capítulo foi iniciado no âmbito do Projecto de Investigação Programada "Gestão Optimizada de Aquíferos" (Proc. 607/11/13098, em curso no LNEC.DH.GIAS em 1999), financiado por Verbas Próprias do LNEC no âmbito do Projecto de I&D do quadriénio 1996/99. O Projecto contou com o apoio do Eng. Emanuele Migliari em 1997, Bolseiro Comunitário (DGXII) do Programa Leonardo através da associação *TechWare-Itália*. Um dos objectivos do Projecto "Gestão Optimizada de Aquíferos" foi o estudo de metodologias que visam a optimização da exploração de recursos hídricos subterrâneos. Parte dos resultados foram apresentados em MIGLIARI e LOBO-FERREIRA (1997).

Este Capítulo Quinto é formado por duas Partes:

- Nesta Parte I apresenta-se o conceito da gestão de águas subterrâneas, desenvolvido no quadro da simulação hidrogeológica e da optimização.
- A Parte II, como resultado da revisão da bibliografia efectuada sobre o tema Gestão Optimizada de Aquíferos, apresenta o estado-da-arte da simulação/optimização aplicada a problemas de planeamento e de gestão do abastecimento por águas subterrâneas, visando a apresentação crítica dos problemas já tratados. Dá-se especial atenção aos problemas em aberto, que incluem objectivos de qualidade de águas subterrâneas.

Os artigos trabalhados na Parte II foram maioritariamente obtidos em bases de dados existentes no LNEC, de que se salientam a "*Water Resources Abstracts*" e a "*Environment Abstracts*", disponíveis em CD-ROM, contendo informação recolhida de 1967 a Janeiro de

1997.

Nos últimos vinte a vinte e cinco anos técnicas de **simulação numérica** (**S**) e de **optimização** (**O**) foram aplicadas em larga escala, em conjunto (**S/O**), a problemas de engenharia. Contudo, por ser o tema central seleccionado para este Programa de Investigação, limitou-se a pesquisa bibliográfica efectuada a problemas de águas subterrâneas, nomeadamente das destinadas ao abastecimento.

A aplicação dos métodos de **S/O** aos estudos de avaliação de parâmetros de aquíferos e ao problema inverso (*e.g.* avaliação da recarga), e a correspondente variação dos níveis freáticos, não são considerados directamente nesta revisão bibliográfica. Parcialmente esses temas foram já abordados no Capítulo Segundo onde se apresentou a avaliação da "recarga de aquíferos" por modelação estocástica inversa.

Serão directamente considerados neste capítulo os modelos de parâmetros distribuídos que simulam o escoamento subterrâneo ou o transporte de poluentes em águas subterrâneas, através da solução de equações diferenciais. Assim não serão tratados os modelos que usem abordagens de gestão baseadas em parâmetros agregados (*lumped parameter models*).

Referir-se-ão os desenvolvimentos da investigação e as áreas ainda problemáticas, as metodologias e as ferramentas matemáticas. Complementando este Capítulo Quinto apresentar-se-á um listagem bibliográfica visando facilitar ao leitor interessado o aprofundamento das técnicas de optimização e de programação matemática.

GORELICK (1983) fez uma revisão bibliográfica muito completa sobre modelos **S/O** de parâmetros distribuídos, para problemas de gestão do abastecimento por águas subterrâneas. Na Parte II deste Capítulo revê-se esse trabalho visando:

- apresentar a investigação desenvolvida e os resultados alcançados nos anos setenta;
- comparar os avanços da investigação actual com o estado-da-arte há quinze anos;
- verificar os desenvolvimentos da investigação em respeito a áreas consideradas críticas e as áreas de investigação futura propostas por GORELICK (1983).

Apontar-se-ão os esforços tendentes a:

- resolver as não-linearidades dos problemas do controle hidráulico de águas subterrâneas;
- tomar em linha de conta os parâmetros de incertezas referentes às águas subterrâneas em

problemas de optimização para o controle hidráulico de águas subterrâneas;

- tomar em linha de conta tanto os aspectos quantitativos como os aspectos qualitativos nos modelos de gestão do abastecimento por águas subterrâneas.

A Parte II deste Capítulo inclui duas secções:

- **a secção 1**, onde se sumariza o trabalho de GORELICK (1983), apontando-se as soluções propostas para sistemas não-lineares de águas subterrâneas e as suas mais importantes conclusões;
- **a secção 2**, onde se revêm os resultados da investigação nos últimos quinze anos, analisando os sucessos tendentes à resolução dos problemas não resolvidos em 1983.

2. PROBLEMAS DE ENGENHARIA ENVOLVENDO O TEMA GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS

O objectivo principal de um gestor de recursos hídricos, que trabalha com sistemas de recursos hídricos subterrâneos é gerir bem a utilização do aquífero. Gerir bem um aquífero implica o controle hidráulico da sua piezometria. Portanto exige, à partida, a execução de um bom projecto e em seguida de uma boa utilização das estruturas hidráulicas de exploração/captação, por forma a garantir que as alterações causadas ao escoamento subterrâneo original se façam de forma a satisfazer os objectivos do projecto, ao mesmo tempo que se respeitam as restrições ambientais impostas.

Durante muitos anos o abastecimento de água foi o principal desafio a estimular o estudo de sistemas de captação de água subterrânea (AS), com base nos conceitos subjacentes à avaliação e à satisfação das necessidades humanas e à quantificação dos volumes de recursos hídricos subterrâneos que podem ser cedidos pelos sistemas aquíferos. Mais recentemente as preocupações ambientais relacionadas com a contaminação de águas subterrâneas, a disponibilização de modelos matemáticos e programas de computador (*i.e. software*) de alta qualidade e, em paralelo, a existência de computadores (*i.e. hardware*) de elevada capacidade de cálculo permitiram a extensão da investigação e a consciencialização do alcance dos progressos feitos no campo da análise de sistemas, permitindo uma boa resposta a questões relacionadas com:

- rebaixamentos piezométricos, nomeadamente por sobreexploração, em estaleiros de construção e obras de engenharia civil;
- escavação e construção de aterros para deposição de resíduos sólidos urbanos e industriais;
- contenção e reabilitação de plumas poluentes por exemplo por "***bombagem e tratamento***" ("*pump and treat*").

A exploração de águas subterrâneas, isoladamente e em complemento dos recursos hídricos superficiais, é utilizada habitual e maioritariamente para a satisfação das necessidades hídricas municipais, industriais e agrícolas em todo o mundo. São os seguintes os problemas associados à utilização e à gestão de águas subterrâneas (WILLIS e YEH, 1987):

- determinação do melhor projecto e programa de captação e exploração, *i.e.* localização das captações no sistema, indicação da potência das bombas, cálculo dos volumes a extrair e duração dos períodos de bombagem, por forma a melhor satisfazer os objectivos de abastecimento;
- determinação do faseamento e desenvolvimento do sistema de captação, *i.e.* do aumento e expansão da capacidade do sistema;
- análise dos projectos de armazenamento superficial e da rede de distribuição das águas subterrâneas para satisfazer a procura hídrica da bacia hidrográfica ou da região.

Adicionalmente, o gestor preocupado com problemas de abastecimento por águas subterrâneas deve ter conhecimento das consequências do esgotamento dos recursos hídricos subterrâneos ou do rebaixamento dos níveis piezométricos, por exemplo a subsidência de terrenos, a intrusão salina em aquíferos costeiros ou a deterioração da qualidade das águas subterrâneas (HALL e DRACUP, 1970). Em aquíferos confinados a subsidência de terrenos está directamente relacionada com as alterações da pressão hidrostática devida à bombagem. A intrusão salina ocorre em aquíferos costeiros quando a descarga de água subterrânea para o mar é diminuída ou invertida por bombagem excessiva. A exploração das águas subterrâneas em zonas costeiras, implica uma redução da descarga natural para o mar, tornando os aquíferos mais vulneráveis aos processos de poluição, tais como os resultantes da lixiviação em aterros sanitários ou da intrusão de águas de qualidade inferior às do aquífero, proveniente de águas superficiais ou de aquíferos adjacentes, devido à maior capacidade de armazenamento disponibilizada.

O rebaixamento dos níveis piezométricos é frequentemente uma condição necessária à construção ou à escavação para obras de engenharia civil. É conseguida pela instalação de captações, de barreiras subterrâneas ou de drenos horizontais. Contudo, a gestão e o controle dos níveis piezométricos também está associada aos objectivos do abastecimento de água. De facto, a manutenção dos níveis piezométricos, acima ou abaixo de certo valor especificado, no tempo e no espaço (*i.e.* em diferentes locais do aquífero) deve ser um dos objectivos de uma boa estratégia de gestão e de abastecimento de recursos hídricos.

Em muitos casos um aquífero é usado tanto como fonte de abastecimento de água como, o solo subjacente, para rejeição de efluentes líquidos. No solo procede-se, eventualmente também, à deposição de resíduos sólidos. Assim, tem de ser decidida a melhor programação das extracções e da eventual rejeição, por forma a proteger os recursos hídricos subterrâneos. As antigas práticas de rejeição de efluentes causaram significativos problemas de contaminação de solos e de águas subterrâneas em muitas áreas. Plumas de fases aquosas de contaminantes provenientes de lixeiras estendem-se hoje por áreas da ordem de centenas ou de milhares de metros quadrados, e em profundidade através do aquífero. Qualquer que seja a fonte poluente, o objectivo de quase todas as estratégias de reabilitação de águas subterrâneas com plumas poluentes, é o de redireccionar o escoamento subterrâneo de forma a deter a migração da pluma, diminuir a sua extensão, conter fisicamente a pluma para uma gradual limpeza ou muito simplesmente alterar a sua configuração inicial. A combinação da extracção e da injecção (*i.e.* a recarga artificial) formam a base da técnica comummente designada por "*bombagem e tratamento*" (*cf.* Capítulo Quarto). Nesta técnica a água é removida do meio subterrâneo, limpa dos contaminantes que contém, e posteriormente injectada no aquífero, despejada num meio superficial ou num sistema de colecta de águas residuais. A muito reduzida velocidade a que a água se desloca no meio subterrâneo, a grande área normalmente afectada pela pluma, e o efeito adsorção-desadsorção de contaminantes em argilas e outros minerais, podem levar a que a reabilitação dos meios subterrâneos contaminados por plumas possa requerer a operação dos sistemas de reabilitação por muitas décadas.

3. A SIMULAÇÃO HIDROGEOLÓGICA E A OPTIMIZAÇÃO

Usando de uma forma coloquial a terminologia da análise de sistemas, qualquer que seja o contexto da sua aplicação em engenharia, poder-se-á dizer que a gestão optimizada de um sistema de recursos naturais significa a selecção do melhor conjunto de decisões e/ou de políticas, *i.e.* a atribuição do melhor conjunto de valores numéricos às **variáveis de decisão** relacionadas com a exploração e o desenvolvimento do sistema, por forma a (Fig. 5.1):

- atingir os ***objectivos*** (*i.e.* as ***metas***) estabelecidos;
- respeitar as ***restrições*** ambientais consideradas;
- manter sob controle as variações das ***variáveis de estado*** do sistema, em cada local e instante de registo seleccionado.

Metas iguais podem ser atingidas com diferentes conjuntos de decisões. A selecção da melhor política pressupõe a existência de uma forma clara de medição da eficácia de políticas alternativas, para alcançar as metas pretendidas. À função escalar das variáveis de decisão que mede a eficácia das diferentes políticas alternativas chama-se ***função objectivo***. Nem todas as políticas são fisicamente viáveis; algumas violam ***restrições*** impostas, não devendo ser tomadas em consideração. O problema é, então, a selecção da ***melhor política exequível e viável.***

A determinação dos objectivos e das restrições é condicionada pelos quadros institucionais e sociais actuais ou planeados. O problema do controle dos sistemas de exploração de águas subterrâneas coloca-se a vários níveis. Na maioria dos problemas de análise de sistemas, em engenharia, a minimização dos custos é o critério mais importante. Em geral será necessário considerar duas componentes de custos: a componente associada à construção e à instalação dos equipamentos (furos, drenos, estações de tratamento) e a componente associada à operação e à manutenção dos equipamentos. No Quadro 5.1 exemplificam-se (1) as variáveis de decisão directamente associadas ao desenvolvimento e à operação de sistemas de águas subterrâneas, (2) as mais comuns restrições hidráulicas, e (3) apresentam-se alguns exemplos de funções objectivo. Faz-se a análise de um ponto de vista do abastecimento por águas subterrâneas (BEAR, 1979). O leitor poderá relacionar com facilidade este tema com outros da engenharia civil.

Uma abordagem óptima da gestão de sistemas implica:

- a solução do ***problema de decisão***: tal requer a existência de algum critério que permita comparar os resultados do sistema e seleccionar a melhor política;
- a solução do ***problema de previsão***: tal requer a existência de ferramentas que permitam prever a resposta do sistema a qualquer política de operação proposta e obter, a partir dela, o novo estado do sistema a partir das condições iniciais ou da situação de referência anterior.

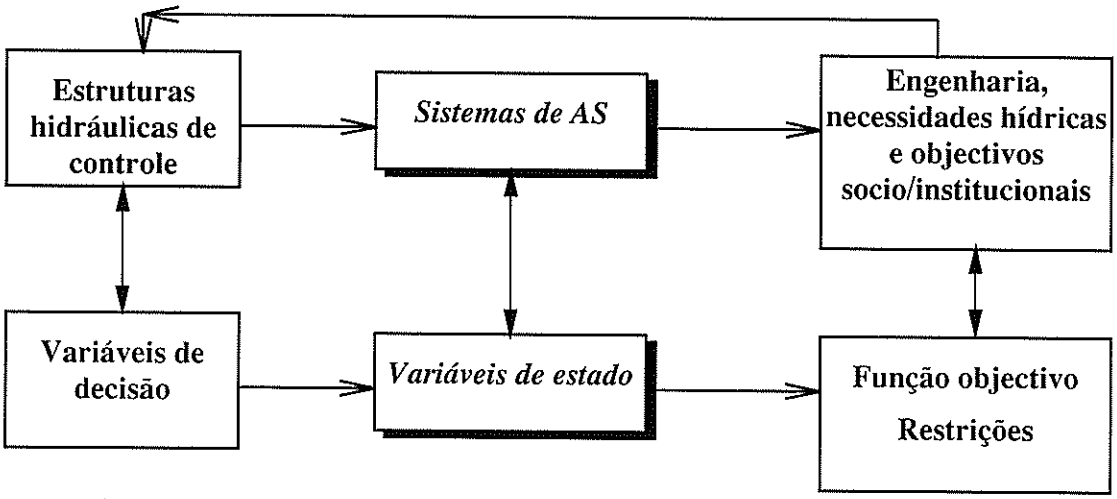


Fig. 5.1 - Esquema da gestão optimizada de um sistema de águas subterrâneas

Um ***problema de decisão*** típico é a atribuição de recursos limitados a utilizadores que se encontram em concorrência. Pode ser formulado do seguinte modo: seleccionar, de entre as várias hipóteses de distribuição dos recursos disponíveis, a hipótese que minimiza ou que maximiza uma ***função objectivo*** especificada, sujeita a um conjunto de ***restrições*** hidrogeológicas, físicas ou económicas. O problema pode ser resolvido de forma satisfatória como um problema de programação matemática. A programação linear (PL) é a mais comum, mas não é única técnica de decisão existente no quadro das soluções de optimização.

Nas últimas três décadas o *problema de previsão* foi resolvido usando modelos de simulação numérica. A divisão de áreas de estudo em células ou em elementos, por exemplo usando os métodos das diferenças finitas (MDF) ou dos elementos finitos (MEF), permitiu a modelação e a resolução de problemas reais, complexos, de escoamento e de transporte de massa em águas subterrâneas. Os modelos de simulação tornaram-se prática corrente para a previsão de impactos em sistemas de águas subterrâneas, como por exemplo o impacto ambiental de extracções de águas subterrâneas. Pretende-se que os sistemas sejam sustentáveis a longo prazo. Outros modelos permitem avaliar a interacção *águas subterrâneas / águas superficiais*,

ou a migração induzida de poluentes.

Na ausência de ferramentas matemáticas apropriadas recorreu-se durante muito tempo ao método da "***tentativa e erro***", também na área dos problemas de gestão de sistemas de recursos hídricos subterrâneos. De acordo com essa abordagem metodológica uma certa estratégia de gestão é testada usando um modelo de simulação. Os resultados do modelo são comparados com os objectivos pretendidos, visando-se avaliar se as metas pretendidas foram atingidas ou se se deveriam continuar as iterações com cenários alternativos, *i.e.* variando os vários parâmetros considerados no projecto de engenharia.

Quadro 5.1 - Exemplos de variáveis de decisão, de restrições e de funções objectivo em águas subterrâneas

variáveis de decisão	• *distribuição no espaço e no tempo de extracções;* • *distribuição no espaço e no tempo de recarga artificial;* • *níveis de água em rios e lagos em contacto com o aquífero;* • *qualidade da água a utilizar na recarga artificial;* • *qualidade da água extraída;* • *capacidade de novas instalações de captação e/ou de recarga artificial, suas localizações e prazos de construção.*
restrições	• *níveis piezométricos regionais ou níveis piezométricos que em certos piezómetros não devam subir além de um valor pré-estabelecido;* • *níveis piezométricos regionais ou níveis piezométricos que em certos piezómetros não devam descer além de um valor pré-estabelecido;* • *descargas de nascentes que não devem descer além de certo valor de referência ou especificado mínimo;* • *escoamento de base fluvial dependente de águas subterrâneas provenientes de aquíferos, que não devem descer além de certo valor de referência ou especificado mínimo;* • *concentração de certas espécies em solução na água de captações em locais especificados que não devem exceder certo valor de referência mínimo ou valor legal especificado;* • *a extracção total deve satisfazer (parcial ou) totalmente as necessidades hídricas da região.*
funções objectivo	• *benefícios totais líquidos (ou valor presente dos benefícios totais, se o faseamento dos custos e dos benefícios for tomado em consideração), resultante da operação do sistema durante certo período de tempo, pretendendo-se maximizar o valor desta função;* • *custo unitário da água distribuída ao consumidor, pretendendo-se minimizar o valor desta função;* • *total de energia consumida, pretendendo-se minimizar o valor desta função;* • *somatório dos valores absolutos das diferenças entre certos níveis piezométricos desejados e os níveis de facto registados. pretendendo-se minimizar o valor desta função.*

A técnica da "**tentativa e erro**" é de aplicação relativamente fácil; contudo, ela não garante a identificação da melhor solução e pode ser afectada pela capacidade de cálculo disponível e pela experiência do engenheiro ou do investigador. Na verdade, os modelos de simulação por si só não são ferramentas suficientes, embora sejam necessárias, para explorar as alternativas de gestão e de controle hidráulico em águas subterrâneas. De acordo com GORELICK (1983) o que é necessário não é apenas um modelo, mas sim a simultânea combinação de um modelo de simulação e de um modelo de optimização, isto é um modelo de gestão optimizado que, de acordo com o problema em análise e com os objectivos de engenharia pretendidos, se define na bibliografia da especialidade como modelo de "gestão do abastecimento por águas subterrâneas", "gestão da qualidade de águas subterrâneas", "gestão de fontes poluentes de águas subterrâneas", etc.

Num modelo combinado de simulação e de optimização (**S/O**), os problemas de decisão e de previsão são resolvidos em simultâneo e o modelo de simulação torna-se numa ferramenta que fornece um conjunto de equações que relacionam as variáveis de estado com as variáveis de decisão. As abordagens mais frequentes de S/O (para incluir o modelo de simulação directamente no modelo de optimização) na solução conjunta de problemas de decisão e de previsão, são baseadas no **método de incorporação** (*embedding method* - EM) e no método da **matriz de resposta** (*response matrix approach* - MR).

No método de incorporação, as técnicas de diferenças finitas ou de elementos finitos da equação que governa o escoamento subterrâneo são tratados como parte integrante do conjunto das restrições do problema de programação matemática. As variáveis de decisão, em cada nó, são as alturas piezométricas e as solicitações locais, como as taxas de bombagem. Na bibliografia da especialidade, em língua inglesa, as equações das restrições incorporadas, embora raramente, são também designadas por "*transformation equations*" (SCHWARZ, 1976).

No método da matriz de resposta, um modelo externo de simulação de águas subterrâneas é usado para desenvolver a matriz de resposta unitária. Cada resposta unitária descreve a influência de um impulso/estímulo (como por exemplo o de uma bombagem durante um curto período de tempo) no valor da altura piezométrica em pontos seleccionados do sistema. Uma matriz resultante do somatório da respostas individuais, a matriz de resposta, é englobada no modelo de optimização. As variáveis de decisão incluem as solicitações locais, como as bombagens as taxas de injecção, e podem também incluir a fixação de alturas piezométricas,

de acordo com indicações do modelador. Na bibliografia as respostas unitárias são frequentemente designadas por "coeficientes de influência" (na literatura anglo-saxónica estes termos são designados por "*influence coefficients*", "*response functions*", ou, mais raramente por "*discrete kernels*", (ILLANGASEKARE e MOREL-SEYTOUX, 1982; MOREL-SEYTOUX e DALY, 1975) ou *"algebraic technological functions"* (MADDOCK III, 1972).

Existe ainda um terceiro método: o método **interligado simulação-optimização** (*linking S/O approach).* A optimização e a simulação interagem entre si, mas são desenvolvidas em separado. O comportamento do sistema de águas subterrâneas é transmitido, ao modelo de optimização, por um modelo de simulação externo que fornece os dados hidrológicos de entrada, mas que não considera as restrições de programação. Além disso, o modelo de optimização pode incluir considerações sobre as propriedades básicas do aquífero, mas enfatiza as regras de decisão económicas gerais, mais do que a complexidade real do sistema de águas subterrâneas.

4. A COMPONENTE DE SIMULAÇÃO HIDROGEOLÓGICA

Nos problemas de previsão quantitativa de sistemas de águas subterrâneas, a solução do problema de previsão é baseada na aproximação numérica da equação do escoamento em meios porosos. BEAR (1979) apresentam a equação do escoamento de águas subterrâneas para meios porosos saturados, heterogéneos e anisotrópicos de aquíferos confinados:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}\left(T_{ij}\frac{\partial \mathrm{H}}{\partial x_j}\right) = S\frac{\partial \mathrm{H}}{\partial t} + R \qquad i,j = 1,2 \qquad (1)$$

onde

T_{ij}	tensor da transmissividade, L^2/T;
H	altura pizométrica, L;
R	recarga por unidade de área, L/T;
S	coeficiente de armazenamento, -;
x_i, x_j	coordenadas cartesianas, L;
t	tempo, T.

Quando a variação das transmissividade, devido a bombagens, é significativa e não desprezável como no caso dos aquíferos livres anisotrópicos de pequena espessura, ter-se-á que considerar a equação diferencial não linear de Boussinesq:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}\left(K_{ij} H \frac{\partial \mathrm{H}}{\partial x_j}\right) = S_y \frac{\partial \mathrm{H}}{\partial t} + R \quad i,j = 1,2 \tag{2}$$

onde

K_{ij} tensor da condutividade hidráulica, L^2/T;
H altura pizométrica, L;
R recarga por unidade de área, L/T;
S_y cedência específica, -;
x_i, x_j coordenadas cartesianas, L;
t tempo, T.

O modelo de simulação que inclui a componente de qualidade das águas subterrâneas, deve envolver também a solução da equação do transporte de massa. Na sua tese para Especialista do LNEC (*cf.* LOBO-FERREIRA, 1986) o autor apresenta o desenvolvimento da equação do transporte em águas subterrâneas, também denominada da convecção-dispersão. Para o caso 2-D, considerando decaimento e adsorsão de uma espécie química dissolvida num meio poroso saturado, a equação da convecção-dispersão pode ser escrita do seguinte modo:

$$R_d \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j}\right) - \frac{\partial}{\partial x_i}(CV_i) - \frac{C'W}{\phi b} - \lambda R_d C \qquad i,j = 1,2 \tag{3}$$

onde:

C concentração da espécie química dissolvida, M/L^3;
D_{ij} tensor dispersão, função de V_i, L^2/T;
V_i velocidade média da água (a nível dos poros) na direcção i, L/T;
b espessura saturada do aquífero, L;
ϕ porosidade efectiva do aquífero, -;
C' concentração de soluto numa fonte ou sumidouro, M/L^3;
W fluxo volumétrico por unidade de área, L/T;
R_d factor de retardamento, -;
λ taxa de decaimento cinético de primeira ordem, $1/T$;
x_i, x_j coordenadas cartesianas, L;
t tempo, T.

O método das diferenças finitas (MDF) e o método dos elementos finitos (MEF) permitem, para sistemas lineares de águas subterrâneas, a transformação das equações do escoamento e do transporte de massa, num sistema de equações diferenciais ordinárias que podem ser expressas do seguinte modo:

$$\begin{aligned} &A\frac{d\Phi}{dt} + B\Phi + \mathbf{g} = 0 \\ &\Phi(0) = \Phi_0 \end{aligned} \tag{4}$$

As matrizes de coeficientes A e B são função do sistema hidráulico do aquífero ou dos parâmetros de qualidade. O vector **g** contém as fontes e os sumidouros, que são as variáveis de controle do sistema, e as condições de fronteira do sistema aquífero. O vector ϕ é o vector do valor das variáveis de estado nos nós e ϕ_0 representa as condições iniciais do problema.

A transformação numérica das equações do escoamento subterrâneo não-saturado usando o MDF e o MEF produz um sistema de equações ordinárias não-lineares. Estas equações podem ser expressas do seguinte modo:

$$D\frac{d\mathbf{h}}{dt} + E(\mathbf{h})\mathbf{h} + \mathbf{r} = 0 \tag{5}$$

onde D e E, são matrizes de coeficientes, que contêm a cedência específica e a condutividade hidráulica. As políticas operacional ou de planeamento e o sistema das condições de fronteira são consideradas no vector **r**; **h** representa o vector da altura piezométrica em todos os pontos do sistema.

Em alguns modelos de gestão ou de previsão é suficiente considerar as equações em regime permanente. Em geral, e como regra, no entanto, tem de se relacionar as varáveis de decisão e o estado do sistema, num horizonte temporal de planeamento de vários anos, *i.e.* tem de se ter em conta um problema de gestão em regime variável, o que requer a solução de equações de resposta dinâmicas. Na Fig 5.2 apresentam-se os métodos mais usuais para a resolução dessas equações.

Os métodos Runge-Kutta (DANIEL e MOORE, 1970) foram desenvolvidos para solucionar as aproximações das equações por séries de Taylor, não requerendo uma definição explícita ou uma avaliação das derivadas, além das de primeira ordem.

A quasi-linearização (BELLMAN e KALABA (1965), TABAK e KUO, 1971) é um processo iterativo que permite alcançar a solução da equação original de Boussinesq a partir da sua expansão de Taylor. O processo iterativo usa o valor da altura piezométrica acabada de calcular na programação linear para actualizar as restrições linearizadas para a próxima solução.

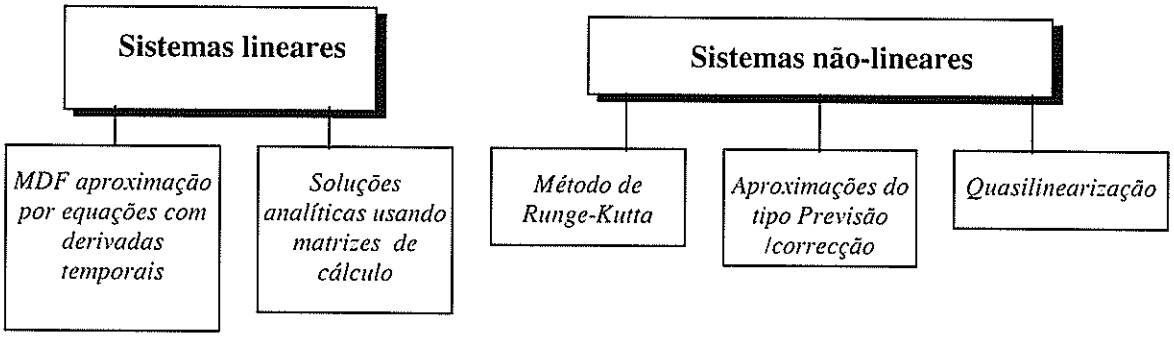


Fig. 5.2 - Métodos de solução de equações de sistemas dinâmicos

A previsão não pode ser bem sucedida a não ser que o problema em análise esteja *bem formulado*. Assim, a previsão da superfície piezométrica requer o conhecimento:

- das fronteiras do domínio do escoamento subterrâneo;
- das condições de fronteira, em fronteiras com fluxo prescrito;
- das fronteiras entre estratos geológicos, unidades e zonas;
- das entradas não controladas (*e.g.* de rios ou recarga por precipitação);
- da distribuição espacial da condutividade hidráulica do aquífero.

A simulação de problemas de transporte de massa, em regime permanente, requer também o conhecimento:

- da localização das fontes de poluição;
- da localização de eventuais plumas de poluição;
- da distribuição espacial da porosidade do meio.

De uma forma simples, devem conhecer-se todas as variáveis presentes nas equações (1) ou (2) e (3). Todas as variáveis dessas equações são conhecidas com um grau de incerteza maior ou menor. Salienta-se, em particular, a incerteza em relação à exacta distribuição regional da condutividade hidráulica originada pela heterogeneidade natural do meio e pela impossibilidade de a medir de forma "exaustiva" (de acordo com GELHAR (1993) é o princípio da indeterminação de Heisenberg aplicado às águas subterrâneas).

FREEZE *et al.* (1990) sugerem a classificação dessas incertezas em dois grupos:

- os que envolvem incerteza em relação à localização das fronteiras;
- os que envolvem incerteza em relação aos valores dos parâmetros.

Uma vez que a maior parte das incertezas é de natureza geológica, esses autores identificaram a necessidade de consideração de dois modelos:

1. um modelo de incerteza geológica;
2. um modelo de incerteza dos parâmetros.

No esquema da Fig. 5.3 apresenta-se uma visão geral das abordagens que se podem usar na simulação para previsão, para se tomarem em consideração tais incertezas.

A análise inversa em águas subterrâneas é utilizada para se gerarem inferências e se reduzir a incerteza em relação à distribuição regional da condutividade hidráulica, usando dados de alturas piezométricas. Há duas classes de problemas de análise inversa: a aproximação *indirecta* (*indirect approach*) e a aproximação *geostatística*. Na aproximação *indirecta* as condutividades do modelo são actualizadas iterativamente até os valores da altura piezométrica do modelo estarem "suficientemente próximos" dos valores observados. A nível da investigação, reconheceu-se já que as soluções indirectas para o problema inverso se deveriam basear num quadro de análise estatístico. PECK *et al.* (1988) agrupam os métodos disponíveis em três categorias:

1. estimação pelo método dos mínimos quadrados ponderado;
2. estimação bayesiana;
3. estimação pelo método da máxima verosimilhança.

Estes três métodos usam um quadro de análise estatístico, não utilizando uma abordagem geoestatística. A abordagem geoestatística difere da estatística uma vez que ao aceitar a *hipótese ergódica*, considera a condutividade hidráulica como uma variável estocástica regional. No artigo RUBIN *et al.* (1990) desenvolve-se a análise do problema inverso ou da ***modelação estocástica inversa***, quantificando-se a incerteza da variável regional condutividade hidráulica (mais precisamente do logaritmo da condutividade hidráulica) do aquífero de Rio Maior.

A teoria da procura *(Search theory)* e os indicadores de **krigagem** *(indicator kriging)* são dois métodos com os quais se pode reduzir a incerteza geológica usando dados de furos ou de perfis litológicos (*logs*) de sondagens.

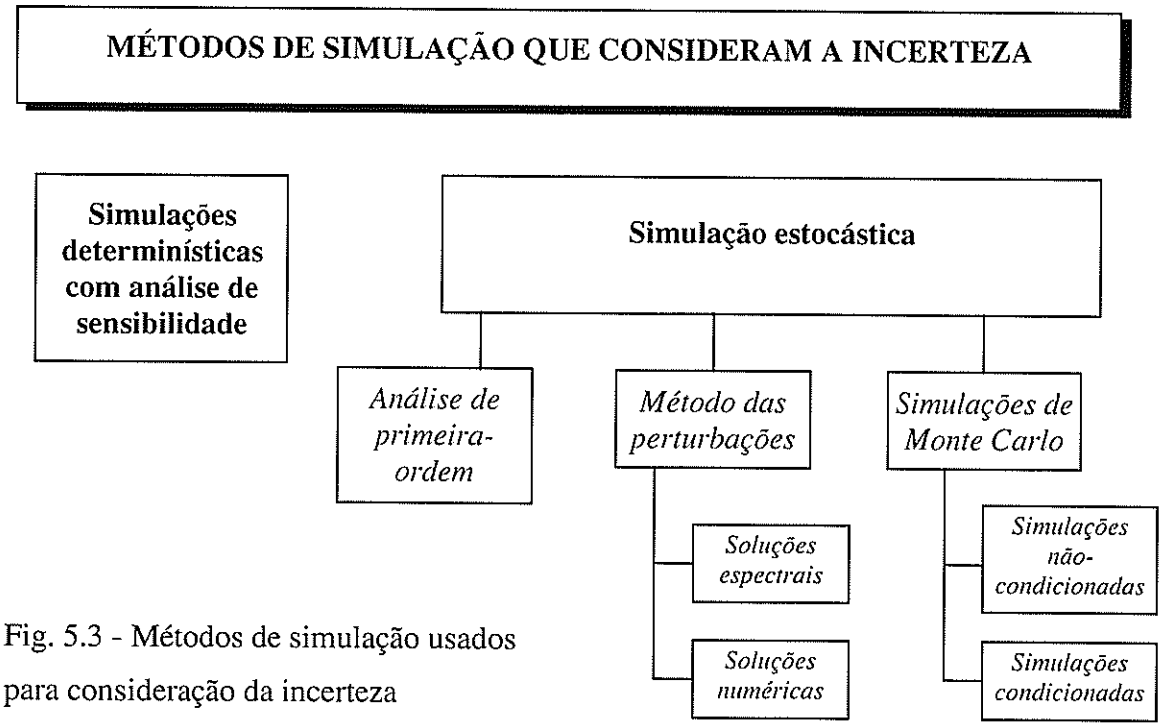


Fig. 5.3 - Métodos de simulação usados para consideração da incerteza

5. A COMPONENTE DE OPTIMIZAÇÃO

A componente de optimização de um modelo de **S/O** pode ser desenvolvida por uma das várias técnicas disponíveis de programação matemática. Na Fig. 5.4 ilustram-se algumas dessas técnicas. Apresenta-se em seguida uma breve introdução a algumas técnicas de programação matemática, segundo WILLIS e YEH (1987).

O problema geral da programação matemática é o de seleccionar um vector de controle ou de decisão **x**, satisfazendo um conjunto de restrições, por forma a maximizar ou a minimizar a função objectivo, F(**x**). Por exemplo:

$$\max z = F(\mathbf{x})$$

sujeito a (6)

$$\mathbf{x} \in \mathbf{X} \qquad (\mathbf{X} \text{ é o conjunto de soluções admissíveis})$$

Assume-se que F seja uma função de valor real de **x** e que seja contínua e diferenciável.

A **programação linear** (PL) destina-se à resolução de um tipo de problema especial: todas as relações entre as variáveis são lineares, tanto no que se refere às restrições como à função objectivo a ser optimizada. Um problema de PL típico pode ser:

$$\min_{\mathbf{x}} \; z = \mathbf{c}^T\mathbf{x} \tag{7}$$

sujeito a

$$\mathbf{Ax} \geq \mathbf{b} \qquad (\mathbf{x} \geq 0) \tag{8}$$

onde

c = vector n-dimensional de coeficientes da função objectivo;
x = vector n-dimensional das variáveis de decisão;
b = vector m-dimensional dos termos independentes (lado direito);
A = $m \times n$ matriz dos coeficientes das restrições;
T = operação transposta.

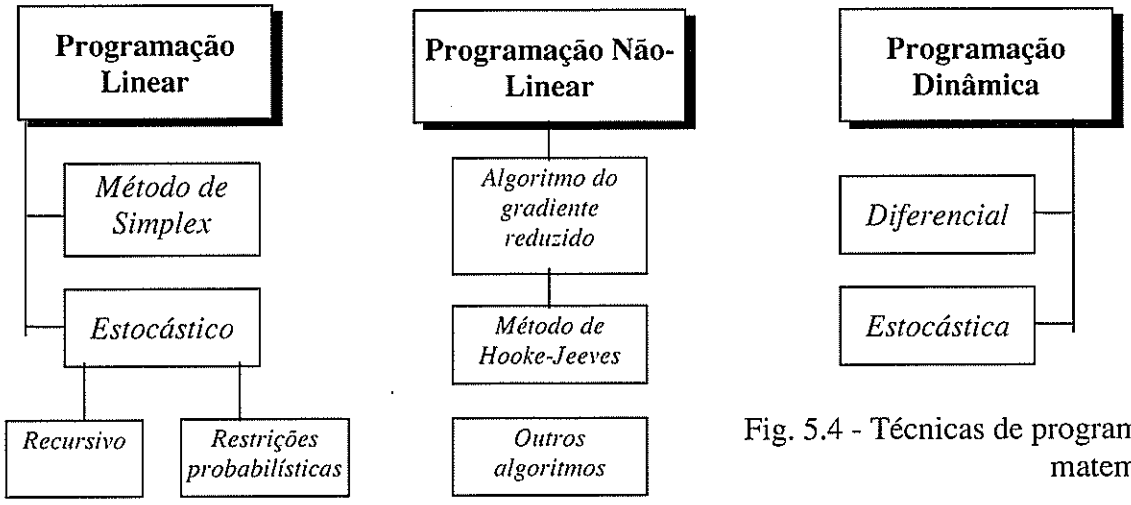


Fig. 5.4 - Técnicas de programação matemática

A programação linear pode ser aplicada de uma forma sistemática a um modelo de gestão de sistemas de aquíferos confinados (*i.e.* com restrições lineares e com funções objectivo lineares). Adaptando modificações apropriadas, pode ainda ser usada para resolver, por exemplo problemas de optimização com funções objectivo quadráticas sujeitas a um conjunto de restrições lineares (problema de programação quadrática).

Os métodos de PL foram alargados para poderem tratar de problemas de optimização com funções objectivo sujeitas a restrições que incluam variáveis aleatórias. Quando a incerteza aparece na função objectivo podem formular-se modelos recorrendo à noção de esperança matemática. O problema de PL estocástico pode ser equacionado da seguinte forma:

$$z = \min_{\mathbf{x}} \{\mathbf{cx} + E[\min(\mathbf{gy})]\} \tag{9}$$

sujeito a

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$$

$$\mathbf{Tx} + \mathbf{Wy} = \mathbf{p} \qquad (10)$$

$$\mathbf{x} \geq 0, \mathbf{y} \geq 0$$

onde E(.) é o operador esperança matemática (*expectation operator*) e
A é a matriz m × n,
T é a matriz m × n,
W é a matriz m × n,
b, c e **g** são vectores m ×1, 1 × n, e 1 × n,
x e **y** são n × 1 vectores de variáveis de decisão,
p é um vector aleatório m × 1.

Quando a incerteza está associada aos níveis das restrições usam-se modelos de **restrições-probabilísticas** (*chance-constrained programming*).

A **Programação Dinâmica** (PD) é constituída por uma sequência de processos de optimização para decisões do tipo multi-estádio (*optimizing multistage decision processes*). Baseia-se no príncipio de que uma política óptima tem a propriedade de qualquer que tenha sido a decisão ou o estado anterior, as decisões remanescentes constituirem uma política óptima com respeito aos estados resultantes dessa decisão prévia (**príncipio** formulado por **BELLMAN**, 1957). A Programação Dinâmica decompõe problemas complexos com um grande número de variáveis de decisão, numa série de sub-problemas que podem ser resolvidos recursivamente. Para o efeito são estabelecidas as chamadas equações recursivas. É apropriada à resolução de problemas de atribuição de recursos em larga escala, em certo número de períodos de planeamento. A formulação em Programação Dinâmica, permite ainda a tradução da não-linearidade ou das características estocásticas que caracterizam um grande número de sistemas de recursos hídricos. A maior limitação desta abordagem é o grande número de variáveis de estado que têm de ser incorporadas nas **equações recursivas.**

JONES *et al.* (1987) desenvolveram um algoritmo diferencial de PD que permite reduzir de uma forma eficaz o problema inerente à grande dimensão associada à solução de modelos de águas subterrâneas, para situações complexas não-lineares. Este tema será adiante abordado com mais pormenor.

A **Programação Não-Linear** (PNL) é a formulação mais geral do problema da programação matemática contínua. Pode tratar com eficácia uma função objectivo não-separável e/ou restrições não-lineares. Em geral, o problema da programação não-linear pode ser formulado

do seguinte modo:

$$\min_{\mathbf{x}} z = f(\mathbf{x}) \tag{11}$$

sujeito a

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) \geq \mathbf{b} \qquad (\mathbf{x} \geq 0) \tag{12}$$

onde

$\mathbf{x}$ = vector n-dimensional das variáveis de decisão;

$f(\mathbf{x})$, $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ = funções dadas do tipo valor real e valor vectorial, respectivamente.

Embora a PNL seja mais geral, a convergência dos correspondentes algoritmos e as necessidades computacionais são os maiores obstáculos à sua aplicação a problemas práticos de gestão de recursos hídricos subterrâneos. Além disso, a matemática envolvida na formulação e na solução de modelos não-lineares é muito mais complexa do que para o caso linear. A programação não-linear, ao contrário da PD, não pode facilmente acomodar variáveis estocásticas ou aleatórias.

Extensões das técnicas anteriormente referidas são citadas na bibliografia como:

- *mixed integer linear (non-linear) programming*;
- *parametric programming*;
- *multiobjective programming*.

A consideração de variáveis discretas e de variáveis binárias (variáveis que podem assumir o valor zero ou o valor um) dá lugar a problemas de programação linear (ou não-linear) inteiros mistos. Os problemas lineares inteiros mistos podem ser resolvidos através de métodos exactos como o método "*branch-and-bound*". Em geral, para a resolução de problemas não-lineares inteiros mistos recorre-se a métodos heurísticos. Dos métodos heurísticos mais recentes adequados à resolução deste tipo de problemas destacam-se: os **algoritmos genéticos**, o **método do recozimento simulado** (*simulated annealing*, também denominado **recristalização**), as **redes neuronais** e os **algoritmos de pesquisa Tabu** (*Tabu search*).

A denominada **programação paramétrica** é uma ferramenta valiosa para análises de sensibilidade de soluções de gestão com respeito a parâmetros do modelo. Quando a função objectivo contém referências a mais de uma meta a atingir, qualquer modelo de gestão

necessita do suporte da programação multi-objectivos, para desenvolver os compromissos entre as estratégias de gestão.

PARTE II : REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

6. O ESTADO-DA-ARTE EM 1983

6.1 Introdução

Nesta secção apresenta-se um resumo da revisão bibliográfica desenvolvida por GORELICK (1983), formada por duas secções: na primeira descrevem-se modelos de gestão para o abastecimento por águas subterrâneas, na segunda apresentam-se modelos designados por "modelos de gestão da qualidade de águas subterrâneas", nos quais o aquífero funciona simultaneamente como fonte de abastecimento de água e como local de rejeição de efluentes.

Dá-se uma panorâmica geral dos modelos de gestão então desenvolvidos e aplicados com sucesso a problemas de gestão de recursos hídricos subterrâneos. Não se aprofundará, neste Plano de Investigação, o tema além do considerado fundamental à percepção do estado-da-arte no passado. O leitor mais interessado poderá aprofundar a sua leitura em MIGLIARI e LOBO-FERREIRA (1997).

6.2 Classificação de Modelos de Gestão do Abastecimento por Águas Subterrâneas

Visando fornecer ao gestor de recursos hídricos subterrâneos regras que facilitem a selecção de modelos combinados de simulação e de gestão, GORELICK (1983) distinguiu duas categorias de abordagens para problemas de gestão do abastecimento por águas subterrâneas.

A primeira categoria, à esquerda na Fig. 5.5, inclui modelos nos quais as decisões de gestão são referentes à hidráulica de águas subterrâneas, em primeiro lugar, embora alguns modelos possam conter explicitamente factores económicos, tais como bombagem e custos de captações. A segunda categoria agrupa modelos que podem ser usados para analisar problemas de atribuição de água, envolvendo objectivos económicos e a interacção *águas*

superficiais - águas subterrâneas ou a atribuição de problemas complexos de atribuição ou de dotações de água. Neste segundo grupo é possível distinguir três tipos diferentes de modelos:

- modelos de resposta hidráulico-económica, extensão directa da abordagem MR (matriz de resposta) a casos em que os problemas agrícolas e/ou de atribuição de águas superficiais desempenham papel importante;
- modelos hierárquicos que usam decomposições em sub-regiões e abordagens MR (sistemas grandes e complexos podem ser tratados como séries de sub-sistemas independentes e podem ser considerados como multi-objectivos);
- modelos interligados simulação-optimização que usam os resultados de modelos externos de simulação como variáveis de entradas em sub-regiões de modelos de optimização económica.

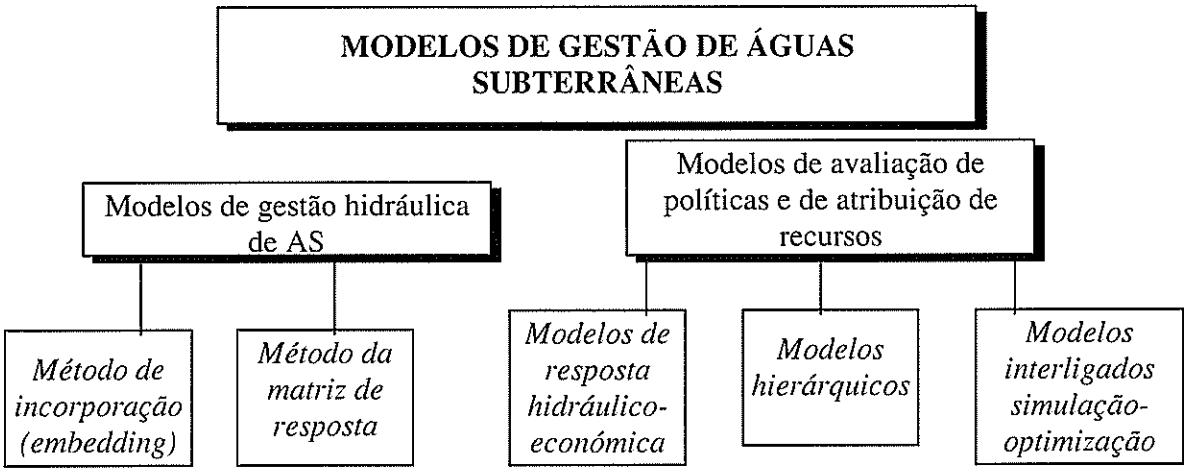


Fig. 5.5: Classificação de modelos de gestão do abastecimento por águas subterrâneas (GORELICK, 1983)

6.3 Modelos de Gestão do Abastecimento por Águas Subterrâneas

O **método de incorporação** *(embedding method, EM)* foi apresentado por AGUADO e REMSON (1974), tanto para aquíferos confinados como para aquíferos livres. Foram em seguida usados por AGUADO *et al.* (1974) num caso de estudo de uma pedreira, para determinação das taxas óptimas de exploração de captações de águas subterrâneas, em regime permanente, visando os níveis freáticos abaixo de certos valores de referência. Num estudo posterior, de AGUADO e REMSON (1980), o mesmo problema foi reformulado para um

problema de custos fixos ("*fixed charge problem*"), a fim de serem tomados em consideração custos iniciais ("*set up costs*") incorridos por cada furo introduzido na solução. Outros estudos, de ALLEY *et al.* (1976) e de WILLIS e NEWMAN (1977), envolvem aplicações do **método de incorporação** (EM) relacionadas com problemas da gestão de aquíferos confinados em regime variável.

A incorporação da ***matriz de resposta*** (*response matrix*) em problemas lineares foi inicialmente proposta em artigos de engenharia de petróleos, mas rapidamente se tornou usual, também, em artigos de águas subterrâneas. MADDOCK III (1972) resolveu o problema da gestão com funções objectivo não-lineares, minimizando o valor actual de custos de bombagem, e usando uma função objectivo quadrática com restrições baseadas na denominada "**função algébrica tecnológica**" ("*algebraic technological function*").

MADDOCK III (1974a) desenvolveu uma função tecnológica não-linear para o caso de um aquífero livre em que a espessura saturada varia com o rebaixamento, *i.e.* um problema de gestão com restrições não-lineares. Variações da abordagem *matriz de resposta* foram aplicados à gestão conjunta de sistemas aquíferos e de rios por TAYLOR (1970) e MOREL-SEYTOUX e DALY (1975). Por sua vez LARSON *et al.* (1977), WILLIS (1983) e HEIDARI (1982) procederam à aplicação do método *matriz de resposta* à gestão de aquíferos regionais, envolvendo largo número de variáveis de decisão.

MADDOCK III (1974b) apresentou o primeiro exemplo de um modelo de gestão caracterizado pela **combinação das componentes hidráulica e económica**. MADDOCK e HAIMES (1975) usaram o método MR conjuntamente com considerações agro-económicas para o estudo do sistema de taxa-quota na gestão de águas subterrâneas aplicado a uma região cenário.

São de salientar os trabalhos de BREDEHOEFT e YOUNG (1970, 1972, 1983) sobre métodos **interligados simulação-optimização** (*linked simulation-optimization approach*).

A abordagem geral dos modelos hierárquicos (*hierarchical models*) é descrita no livro de HAIMES (1977). YU e HAIMES (1974) foram os primeiros a empregar esta abordagem para optimizar um problema regional de atribuição de águas subterrâneas complexo. HAIMES e DREIZEN (1979) usaram ambos o método da matriz de resposta e uma estrutura de modelo multi-níveis para optimizar um sistema de uso combinado complexo (*conjunctive use*).

6.4 Classificação de Modelos de Gestão da Qualidade de Águas Subterrâneas

Nesta secção dedicada a modelos de gestão da qualidade de águas subterrâneas, GORELICK (1983) agrupa os modelos **S/O**, aplicados ao uso conjunto de um aquífero, simultaneamente como fonte de abastecimento de recursos hídricos e como local de rejeição de águas residuais, distinguindo:

- modelos de gestão em regime permanente;
- modelos de gestão em regime variável.

O primeiro grupo inclui métodos de gestão para a distribuição de poluentes em regime permanente, que frequentemente representam o pior cenário de uma mancha de poluição migrando de um aterro sanitário ou de uma lixeira.

O segundo grupo inclui métodos de gestão dinâmica de uma fonte poluente de águas subterrâneas porque, por exemplo uma decisão em relação à deposição de resíduos sólidos pode durante várias décadas não se observar como poluição em poços, furos ou rios localizados a jusante.

6.5 Modelos de Gestão da Qualidade de Águas Subterrâneas

WILLIS (1976), usando o método da matriz de resposta e a programação mista inteira apresentou um **modelo em regime permanente** para minimizar os custos do tratamento de resíduos mantendo os padrões de qualidade das águas subterrâneas. FUTAGAMI *et al.* (1976), GORELICK e REMSON (1982a) usaram o método de incorporação.

WILLIS (1979) propôs um **modelo em regime variável**, dividindo o problema de planeamento em duas componentes: uma componente hidráulica de gestão de águas subterrâneas e uma componente de gestão da fonte de poluição. As duas componentes do problema foram formuladas e resolvidas como problemas separados de programação linear.

GORELICK e REMSON (1982b) abordaram a gestão dinâmica da qualidade de águas subterrâneas usando o método da matriz de resposta *concentração*, adoptando decisões de gestão de resíduos até os poluentes serem removidos do sistema. O principal factor que os diferencia de WILLIS (1979), é o de serem os mesmos os ciclos de deposição e o tempo durante o qual a poluição de águas subterrâneas é preocupante.

6.6 Conclusões da Revisão feita por GORELICK (1983)

Com base nas considerações efectuadas anteriormente e na revisão bibliográfica complementar desenvolvida por MIGLIARI e LOBO-FERREIRA (1997), apresentam-se nesta secção, de um forma detalhada, as conclusões da revisão bibliográfica de GORELICK (1983). Esse autor descreve a grande variedade de problemas de gestão do abastecimento por águas subterrâneas que podem ser resolvidos, a vários níveis de complexidade, graças ao uso combinado de modelos hidráulicos de simulação e de técnicas de optimização (**S/O**). Salientam-se os seguintes:

- determinação de taxas óptimas de bombagem/recarga e localização óptima de captações, sujeitas a restrições de rebaixamentos, gradientes e necessidades de água;
- obtenção de linearizações adequadas, associadas a problemas hidráulicos de aquíferos livres não-lineares;
- resolução de problemas de custos de instalação de captações ou de custos da energia necessária à bombagem;
- resolução de problemas reais, complexos, de gestão de águas subterrâneas e problemas da distribuição do uso conjunto de águas superficiais e de águas subterrâneas;
- eficácia de regulamentação a nível da bacia hidrográfica e de políticas de gestão da água, tais como as implicações da fixação de taxas e quotas, que podem ser avaliadas em modelos antes de serem implementadas;
- resolução com sucesso de um conjunto de problemas de gestão de problemas de qualidade de águas subterrâneas, tanto para problemas em regime permanente como em regime variável.

Algumas considerações sobressaem da revisão crítica de GORELIK (1983), apontando para avanços, inovações e limitações à gestão do abastecimento por águas subterrâneas, em 1983. Salientam-se as seguintes:

- As técnicas e abordagens de gestão estavam limitadas a modelos bi-dimensionais; à medida que se ganhassem novas experiências com modelos 3-D, as aplicações de métodos de gestão dever-se-iam expandir.
- O método da matriz de resposta (*response matrix*) pode tratar grandes sistemas, em regime

variável, de um modo eficiente; as restrições são incluídas só para certas localizações e para certos instantes; restrições ou variáveis de decisão desnecessárias não são incorporadas no modelo de gestão por programação linear.

- **O método de incorporação** (*embedding approach*) pode tornar-se numa ferramenta matemática muito valiosa se a investigação futura relacionada com o **método de *simplex*** revisto permitir a resolução de problemas de programação linear que contenham equações discretizadas incorporadas. Se os métodos de decomposição puderem ser desenvolvidos em conjunto com o método de incorporação, poderia vir a ser possível (em 1983) a solução de grandes problemas, em regime variável.

- São necessários novos modelos (melhorados) de gestão hidráulica para se poder tomar em consideração a incerteza de conhecimento dos parâmetros de aquíferos. De forma semelhante, o uso conjunto de modelos de atribuição (*allocation models*) poderá ser aumentado para se poder tomar em consideração a variabilidade dos regimes dos rios.

- A investigação sobre modelos de gestão tratou primeiro os casos que envolvem restrições lineares e em seguida os que contêm restrições que podem ser linearizadas, tais como as que advêm da consideração do escoamento em aquíferos livres. Os modelos de gestão de águas subterrâneas que incluam restrições não-lineares são uma área chave de investigação no futuro.

- Os modelos de avaliação de políticas e de atribuição de águas subterrâneas geralmente desprezam considerações sobre a qualidade da água. A investigação que incluísse conjuntamente a hidráulica e a qualidade de águas subterrâneas com factores de gestão política e económica seria valiosa. O objectivo deveria ser o desenvolvimento de instrumentos de política que simultaneamente evitassem excessos de utilização de água e futuras degradações da qualidade da água.

- Em 1983, apenas os factores económicos tinham sido seriamente considerados para inspeccionar a resposta dos utilizadores da água a estratégias de gestão. Ainda tinham de ser construídos modelos de avaliação de políticas de águas subterrâneas que incluíssem a larga variedade de aspectos económicos, políticos e legais existentes.

GORELICK (1983) faz também algumas considerações, muito interessantes, acerca dos modelos de gestão da qualidade de águas subterrâneas:

- Num cenário realista de gestão envolvendo questões de engenharia, como por exemplo a

deposição de resíduos sólidos, têm-se como variáveis de decisão as taxas de bombagem e de recarga, que são por conseguinte incógnitas; em consequência, o campo de velocidades e os coeficientes de dispersão da equação do transporte (3) permanecem indeterminados. É necessário o desenvolvimento de investigação para a solução de tais problemas não-lineares de gestão e controle da qualidade das águas subterrâneas.

- As interacções químicas, de compostos múltiplos, que geralmente acompanham o transporte de poluentes em águas subterrâneas, são usualmente não-lineares; a gestão óptima de tais sistemas não-lineares requer inovação envolvendo a união de simulações numéricas com programação não-linear.
- Em problemas de intrusão salina o campo de velocidades das águas subterrâneas, é uma função da concentração dos solutos devido à diferença de densidades entre a água doce e a água salgada, que funciona como uma significativa força motora para a migração dos solutos. Assim as não-linearidades aparecem nos termos advectivo e dispersivo. A simulação deste sistema não-linear foi feita (em 1983) com sucesso. No entanto, era necessária a investigação para desenvolver modelos deste sistema não-linear, que integrassem conjuntamente a simulação e a gestão.

7. A INVESTIGAÇÃO DESDE 1983

7.1 Introdução

Nas secções seguintes revêm-se os avanços registados na investigação em simulação-optimização (**S/O**) para a gestão do abastecimento por águas subterrâneas, desde 1983.

Na secção 7.2 analisam-se, ponto por ponto, os problemas não resolvidos e as linhas de investigação apontadas pela revisão bibliográfica efectuada por GORELICK (1983).

Na secção 7.3 desenvolve-se a análise relativa à **extracção segura** e ao **nível objectivo** para gestão do abastecimento por águas subterrâneas, *i.e.* as estratégias de gestão caracterizadas por uma atenção especial em relação ao esgotamento das reservas hídricas e ao tema da gestão sustentável, garantindo o abastecimento ao longo do tempo.

Uma abordagem moderna de gestão de águas subterrâneas deve considerar tanto os aspectos quantitativos como os qualitativos. Nos trabalhos revistos nas secções anteriores os objectivos

de qualidade de águas subterrâneas e as restrições foram incluídos nos modelos de gestão de sistemas aquíferos usados para abastecimento e para rejeição de efluentes. Diversas actividades humanas afectam diariamente a qualidade das águas subterrâneas: as práticas agrícolas e de irrigação, os aterros sanitários e as lixeiras, a contaminação de águas superficiais, etc. É, assim, premente a necessidade de desenvolver estratégias de gestão do abastecimento que respondam às solicitações da procura, ao mesmo tempo que protegem os recursos hídricos. Para enfatizar este conceito dedicou-se uma secção separada deste capítulo aos modelos de gestão do abastecimento que explicitamente incluem as questões relacionadas com a produção do aquífero e os objectivos de qualidade. Essa secção inclui ainda dois pontos que realçam a gestão de aquíferos costeiros e os problemas especiais de gestão da qualidade de águas subterrâneas que apresentam. Finalmente, na secção 7.5 apresentam-se os modelos para gestão de fontes de poluentes de águas subterrâneas. Nas últimas décadas a investigação relativa à gestão da qualidade de águas subterrâneas recebeu um forte impulso devido à crescente necessidade de reabilitar aquíferos (principalmente) com técnicas de "*bombagem e tratamento*", associadas muitas vezes a tecnologias de contenção da poluição no aquífero por drenos, valas e paredes moldadas.

7.2 Modelos de Gestão do Abastecimento por Águas Subterrâneas

Os grandes volumes de memória de computador requeridos, as dificuldades numéricas associadas e as instabilidades numéricas, motivaram que o **método de incorporação** (*embedding approach*) fosse usado inicialmente apenas em problemas de pequena dimensão e em ***regime permanente***. O método da **matriz de resposta** (MR) foi considerado mais prático para grandes sistemas aquíferos.

As dificuldades inerentes à aplicação das técnicas do **método de incorporação** (EM), que nunca chegaram a ser muito usadas, não ficaram solucionadas com o estudo de TUNG e KOLTERMANN (1985). Pelo contrário, os autores ilustrando experiências computacionais realizadas com o método EM para a gestão e o planeamento de aquíferos confinados desincentivaram a sua aplicação.

Nos últimos anos, especialmente acoplados à programação dinâmica multi-objectivos, os métodos EM mostraram ser também uma ferramenta viável para a resolução de complexos problemas de planeamento a grande escala (CASOLA *et al.* (1986), YAZICIGIL e RASHEEDUDDIN (1987) e WILLIS *et al.*, 1989).

Já na década de 90, PERALTA *et al.* (1991a) compararam as abordagens **matriz de resposta** e **método de incorporação** (*MR* e *EM*) para calcular estratégias destinadas a extracções máximas de águas subterrâneas em regime permanente em aquíferos confinados, sugerindo **ser preferível o método de incorporação**, se houver uma elevada percentagem de células em bombagem, ou se se tiver de restringir ou calcular um elevado número de alturas piezométricas com o modelo de optimização.

Nos últimos quinze anos dedicou-se um grande esforço de investigação à gestão optimizada de sistemas aquíferos confinados e ao controle óptimo aplicado a problemas em que são usadas representações não-lineares das águas subterrâneas. Salientam-se os seguintes temas:

- aperfeiçoamento da aliança entre a Programação Linear (PL) e várias técnicas de linearização dentro de esquemas iterativos (DANSKIN e GORELICK (1985), WILLIS e FINNEY (1985), LALL e SANTINI (1989) e TAKAHASHI e PERALTA, 1995);
- aplicação de algoritmos de Programação Não-Linear (PNL) ou Programação Dinâmica (PD) (WANAKULE e MAYS (1986) e JONES *et al.*, 1987);
- formulação cada vez mais realista dos modelos de optimização, considerando os aspectos discretos decorrentes da localização e escolha das infra-estruturas hidráulicas e dos respectivos custos fixos, sendo a resolução de modelos efectuada através de métodos heurísticos (MCKINNEY e LIN (1994) e DOUGHERTY e MARRYOTT, 1991).

A incorporação de um **modelo de incerteza** num modelo **S/O**, *i.e.* o desenvolvimento de modelos de gestão de águas subterrâneas que têm capacidade de considerar a natureza aleatória do sistema de escoamento subterrâneo e deduzir soluções correspondentes, constitui um dos maiores desafios da gestão optimizada de águas subterrâneas. Contudo, só muito recentemente algum esforço significativo foi dedicado ao prosseguimento desta tarefa no contexto dos modelos de gestão do abastecimento por águas subterrâneas.

TUNG (1986) foi pioneiro na aplicação da técnica das **restrições-probabilísticas** (*chance-constrained approach*). HANTUSH e MARINO (1989) desenvolveram um modelo de optimização com **restrições-probabilísticas** para um sistema *rio-aquífero*.

GEORGAKAKOS e VLATSA (1991) formularam um modelo estocástico completo de controle para gestão de águas subterrâneas, usando programação estocástica e aplicando-a a um sistema aquífero confinado, de duas camadas, com várias condições de fronteira e vários níveis de incerteza.

REICHARD (1995) desenvolveu uma abordagem de modelação **S/O** para gestão regional de águas superficiais - águas subterrâneas que explicitamente incorpora a incerteza do abastecimento por águas de superfície. A variabilidade espacial das propriedades hidrogeológicas não foi considerada.

O leitor mais interessado neste tema poderá aprofundar a sua leitura em MIGLIARI e LOBO-FERREIRA (1997).

7.3 Conceitos de "Exploração Segura" e de "Nível-Objectivo" na Gestão do Abastecimento por Águas Subterrâneas

Foram apresentadas várias definições para os conceitos de "**exploração segura**" e de "**nível-objectivo**" na gestão do abastecimento por águas subterrâneas. Talvez o consenso seja definir "**nível de exploração segura do aquífero**" como **o volume máximo anual extraível de um aquífero que não produza resultados indesejáveis,** como rebaixamentos excessivos do nível piezométrico, redução da qualidade das águas subterrâneas, subsidência de terrenos, desrespeito por direitos de uso de água legais ou adquiridos, etc. Assim, a estratégia de gestão de águas subterrâneas com base no conceito de exploração segura pode ser entendida como a definição do limite superior de captação que mantém o equilíbrio a longo prazo em relação à recarga média do aquífero.

No entanto, uma abordagem hidrológica essencialmente estática quanto ao conceito de nível de exploração segura do aquífero parece ser ambígua e insuficiente, uma vez que a natureza dos sistemas aquíferos é dinâmica em si e existe um grande número de factores que intervêm na gestão. Por exemplo:

- não há nenhuma indicação implícita de quais sejam os níveis freáticos mais aconselháveis (a exploração sustentável de um aquífero, em equilíbrio com a recarga, pode ser mantida a qualquer nível freático fisicamente possível);
- a taxa de recarga do aquífero pode depender do nível piezométrico (baixando o nível piezométrico podem-se aumentar as entradas de água provenientes de meios circundantes e limitar as saídas do aquífero);
- não há considerações económicas e/ou compromissos evidentes (o aumento dos custos de bombagem de um nível piezométrico inferior pode ser muito menos importante do que os

benefícios a longo prazo do aumento da exploração).

Numa comunicação a um simpósio internacional, BEAR e LEVIN (1967) escreviam: "O critério de exploração óptima deve substituir o usual critério de exploração segura. A exploração óptima é um critério baseado (1) nas características físicas do aquífero, incluindo o seu reabastecimento natural, *i.e.* a sua recarga e a sua natureza estocástica, (2) em considerações económicas, incluindo o objectivo da operação considerada, e (3) nas propriedades do sistema de águas subterrâneas do qual o aquífero é uma das componentes". O conceito de exploração óptima, por conseguinte, incorpora em si, tanto as características hidrológicas do sistema físico de águas subterrâneas como as da gestão.

DOMENICO (1972) salientou a necessidade de se focar na determinação de uma solução óptima que reconheça os possíveis efeitos indesejáveis da exploração do aquífero, incluindo-os num esquema de gestão óptimo. O conceito de exploração segura parece ter caído em desuso e passou a ser formulado como exploração perene, exploração sustentável, etc.

KNAPP e FEINERMAN (1985) trabalharam e aplicaram uma nova teoria, contendo soluções para a gestão óptima em regimes permanentes, sugerindo que poderiam substituir os conceitos de exploração segura e os conceitos afins. O conceito de regime permanente óptimo é semelhante ao de exploração segura se se considerar que descreve a longo-prazo o equilíbrio do sistema. As extracções implícitas podem ser mantidas indefinidamente depois de um período de transição apropriado. Contudo, a teoria do regime permanente óptimo, proposta por KNAPP e FEINERMAN (1985), baseia-se num modelo dinâmico que incorpora tanto variáveis económicas como hidrológicas. Eles raciocinaram que o problema da determinação da exploração óptima das águas subterrâneas no tempo "... é dinâmica uma vez que a utilização da águas subterrâneas num determinado período de tempo influencia a disponibilidade e o custo em períodos futuros". Lembremo-nos, por exemplo, das origens da situação, de certo modo semelhante, que existiu até à pouco tempo com o custo da energia eléctrica na cidade do Porto *vs.* o custo no Centro e no Sul do País. Os autores continuam "... um caminho óptimo para as extracções (no tempo), deve equilibrar os benefícios do consumo adicional no período corrente com os custos de maiores alturas de bombagem e/ou a redução da disponibilidade em períodos futuros". Os autores defenderam a utilidade de serem calculadas soluções óptimas em *regime permanente*, porque num regime óptimo, as extracções, as alturas de bombagem, e os custos convergem para níveis em *regime permanente*; assim, o *regime permanente* óptimo (que pode ser calculado de forma

independente, e de forma muito mais fácil do que a solução da optimização total do problema), pode ser usado para uma análise preliminar e para orientar as decisões do problema de gestão, na ausência ou na impossibilidade de obtenção de uma solução total para o problema de optimização dinâmica.

CHAU (1988) analisou a exploração sustentável de águas subterrâneas de um aquífero confinado regional, em Cold Lake, (Alberta, Canada), visando ajudar no planeamento dos recursos hídricos e na formulação de planos de gestão a longo-prazo para atribuição de água a utilizadores industriais. Foi usado o método dos elementos finitos (de Galerkin) para a construção do conjunto de equações lineares algébricas a serem incorporadas no conjunto de restrições do modelo de optimização (com programação linear), obtendo-se os seguintes resultados:

- determinação da exploração de águas subterrâneas que maximiza a utilização da água do aquífero;
- análise de acordos possíveis para o abastecimento de água a diversos utilizadores;
- identificação da localização dos furos de captação e do valor das bombagens que melhor interceptem o escoamento subterrâneo do sistema aquífero.

O leitor poderá encontrar estudos semelhantes sobre a exploração a longo-prazo (*sustentável*) de águas subterrâneas em: PERALTA *et al.* (1991b), PERALTA *et al.* (1995a), TAKAHASHI e PERALTA (1995).

Uma estratégia de gestão de tipo "**nível objectivo**" (*target level approach*), isto é de um esquema de captações espacialmente distribuído dedicado a manter os níveis de águas subterrâneas no valor "especificado" durante um período de tempo determinado, é análoga à do conceito de "nível de exploração seguro", uma vez que é programada para evitar resultados indesejáveis.

A abordagem "nível objectivo" (*target level approach*) é adequada para alguns tipos de problemas de gestão hidráulica de águas subterrâneas. A função objectivo tem forma quadrática e representa a minimização da soma ponderada dos desvios quadrados médios entre a altura piezométrica optimizada e os valores "objectivo" da altura piezométrica. A "altura piezométrica objectivo" é simplesmente assumida como sendo a prístina de referência. MACK (1985) apontou as seguintes vantagens da utilização de níveis objectivo na gestão de águas subterrâneas:

- os níveis objectivo encorajam a utilização conjunta de águas superficiais e de águas subterrâneas;
- ajudam a fomentar a recarga (*help induce recharge*);
- fornecem um meio de evitar as consequências de contaminação de águas subterrâneas;
- podem ser administradas à distância (electronicamente).

YAZDANIAN e PERALTA (1986) argumentaram que os objectivos anteriormente referidos da programação por objectivos podem ser vistos como um processo de **programação multi-objectivos** que tenta encontrar o melhor compromisso entre *m* objectivos individuais, onde *m* é o número de pontos em que a altura piezométrica objectivo é conhecida. Esses autores apresentaram uma aplicação do modelo, usando dados da região das Grandes Planícies, no Arkansas, EUA.

MAKINDE-ODUSOLA e MARINO (1989) usaram o controle óptimo com formulação regressiva acoplada no **método recursivo** (*feedback*), uma técnica da programação dinâmica baseada no princípio da optimalidade acoplado ao modelo de simulação SUTRA (que utiliza o método dos elementos finitos, MEF).

Os mesmos autores mostraram que o modelo usado é essencialmente um modelo de simulação de águas subterrâneas inverso, uma vez que as alturas piezométricas são usadas para calcular a estratégia de bombagem óptima usando regras recursivas. Uma vez calculadas, estas regras recursivas podem ser usadas para a gestão operacional do aquífero.

Aplicações interessantes da abordagem *target level* a problemas de irrigação agrícola podem ser encontradas em PERALTA e KOWALSKI (1986), LATIF e JAMES (1991) e BARLOW *et al.* (1996).

7.4 Modelos de Gestão do Abastecimento por Águas Subterrâneas Incluindo Objectivos de Qualidade de Águas Subterrâneas

VARLJEN e SHAFER (1993) aplicaram a abordagem **S/O** para fornecerem guias indicativos destinados à protecção de águas subterrâneas, destinadas ao abastecimento municipal, de contaminações por gestão do zonamento para protecção de captações de águas subterrâneas. O objectivo dos autores era o de especificar os níveis de extracção de um campo de captações de modo a minimizar o risco de contaminação em relação às fontes de poluição existentes ou

potenciais, ao mesmo tempo que mantinham o volume total a extrair do aquífero. Além dos níveis de exploração do aquífero, a determinação das envolventes de recarga, isto é das linhas de fluxo exteriores solicitadas pelas captações, dependem do zonamento imposto pelas legislações nacionais ou comunitária.

LOBO-FERREIRA e CIABATTI (1996) e LOBO-FERREIRA e CIABATTI (1997) abordaram este tema, apresentando recomendações para a protecção e gestão integrada de captações de águas subterrâneas em Portugal, aplicando diversas legislações europeias e americanas às condições prevalecentes no campo de captações destinadas ao abastecimento municipal de Estarreja.

PERALTA *et al.* (1995b) apresentaram uma nova abordagem hierárquica (MODCON) para calcularem estratégias de utilização de águas subterrâneas, que se aproximem das óptimas para abastecimento, mantendo objectivos de qualidade pré-estabelecidos.

KESHARI e DATTA (1996) formularam um modelo integrado de gestão de águas subterrâneas como um problema de optimização multivariável restringido, baseado em programação não-linear e no método de incorporação.

EJAZ e PERALTA (1995) propuseram um método para incorporar restrições de qualidade de águas superficiais numa utilização conjunta de água usando modelos **S/O** para conectar hidraulicamente rios e sistemas aquíferos.

A bibliografia encontrada sobre modelos de **S/O** aplicados a problemas de **gestão de águas subterrâneas em aquíferos costeiros** foi muito reduzida. Citam-se os seguintes trabalhos:

- SHAMIR *et al.* (1984) determinaram a política óptima de operação anual de um aquífero costeiro à luz de vários objectivos e de restrições impostas por considerações de longo-prazo.
- O controle da intrusão salina em aquíferos livres ou em sistemas de aquíferos regionais confinados foi estruturada e resolvida como um problema de controle óptimo por WILLIS e FINNEY (1988), usando tanto o método dos coeficientes de influência aliado à programação quadrática como os métodos não-lineares de gradiente-reduzido (*reduced-gradient*) em conjugação com um algoritmo do tipo quasi-Newtoniano (*quasi-Newton*).
- FINNEY *et al.* (1992) mostraram a viabilidade da abordagem do controle óptimo para problemas de intrusão salina ocorridos num grande sistema multi-aquífero não-linear,

localizado na região de Jacarta, Indonésia.

- Mais recentemente HALLAJI e YAZICIGIL (1996) desenvolveram sete modelos de gestão de águas subterrâneas para determinar o planeamento óptimo e as políticas de operação de um aquífero ameaçado por intrusão salina no sul da Turquia.
- EMCH e YEH (1998) apresentaram um modelo multi-objectivos não-linear para a gestão de águas superficiais e subterrâneas numa região costeira. Foram considerados dois objectivos: a minimização do custo de utilização das águas superficiais e subterrâneas e a minimização da intrusão salina.

7.5 Modelos para Gestão de Fontes de Poluentes de Águas Subterrâneas

Nas últimas décadas a investigação relativa à gestão da qualidade de águas subterrâneas recebeu um forte impulso devido à crescente necessidade de reabilitar aquíferos com técnicas de "**bombagem e tratamento**", associadas, muitas vezes, a tecnologias de contenção da poluição no aquífero por drenos, valas e paredes moldadas.

LEITÃO (1997) desenvolve o tema "Metodologias para a reabilitação de aquíferos poluídos". Embora não fosse objectivo desse estudo a utilização de técnicas de optimização, a autora apresenta uma secção onde aborda introdutoriamente o tema. Extraem-se em seguida algumas referências analisadas nesse trabalho.

GREENWALD e GORELICK (1989) apresentam uma detalhada revisão bibliográfica dos modelos de **simulação/optimização (S/O)**, classificando-os em três categorias de acordo com os seus objectivos globais de simulação. No primeiro tipo de categoria, a simulação dos componentes do escoamento, como a piezometria e os gradientes hidráulicos, é a única considerada. Os modelos mais divulgados neste tipo de simulação são os de JAVANDEL e TSANG (1986) e WAGNER e GORELICK (1987). No segundo tipo de categoria, a simulação permite a análise do tempo associado ao transporte de contaminantes, com base na convecção (ATWOOD e GORELICK (1985), LEFKOFF e GORELICK (1986) e GREENWALD e GORELICK, 1989). Finalmente, na terceira categoria, a advecção e a dispersão hidrodinâmica são simuladas para dar as concentrações no espaço e/ou no tempo. Os modelos apresentados por GORELICK *et al.* (1984), AHLFELD *et al.* (1986), WAGNER e GORELICK (1987) e AHLFELD *et al.* (1988) são os mais conhecidos dentro da última categoria referida.

De acordo com LEITÃO (1997), a optimização da melhor estratégia de reabilitação depende das restrições impostas e dos critérios que se pretendem considerar. Os objectivos podem ser seleccionar um sistema de bombagem que minimize a poluição no aquífero, ao fim de um determinado período de tempo. Podem também ser dadas condições físicas de limites máximos de bombagem impostos por condições económicas. AHLFELD *et al.* (1988) propõem um sistema de optimização que permite seleccionar o melhor cenário correspondente a uma maior remoção de poluente do aquífero, no menor período de tempo, respeitando condições de extracção máximas, previamente impostas, e a redução dos valores da concentração para níveis específicos dentro de um determinado período de tempo e aos mais baixos custos. Diversos outros tipos de modelos de optimização com diferentes condições de base foram descritos pelos autores anteriormente citados.

Este tipo de metodologia apresenta-se actualmente como a mais promissora e a que tem um campo de aplicação mais abrangente, por dois motivos distintos: (1) permite ultrapassar as limitações dos modelos analíticos em representar sistemas complexos e (2) evita a subjectividade dos métodos de tentativa e erro. A sua aplicação, por ser mais complexa, morosa e dispendiosa é, contudo, passível de ser substituída com vantagem por outro dos métodos descritos, nomeadamente para os casos de aquíferos pouco heterogéneos.

Tanto os métodos da **matriz de resposta** (MR) como os **métodos de incorporação** (*embedding methods*) foram aplicados à gestão da contaminação de águas subterrâneas, usando a programação linear (muitos exemplos), a programação quadrática (LEFKOFF e GORELICK (1986), PERALTA e WARD (1991)), a programação não-linear (GORELICK *et al.* (1984), AHLFELD *et al.* (1986; 1988a, b), WAGNER e GORELICK (1987), e diversas técnicas de programação dinâmica (ANDRICEVIC e KITANIDIS (1990), LEE e KITANIDIS (1991) e CULVER e SHOEMAKER (1992).

Em modelos de **S/O** lineares e em alguns modelos não-lineares, a migração da contaminação é controlada principalmente por monitorização das alturas piezométricas e dos correspondentes gradientes, ou então das velocidades das águas subterrâneas ou dos poluentes (COLARULLO *et al.*, (1984), ATWOOD e GORELICK (1985), LEFKOFF e GORELICK (1986), AHLFELD (1990) e PERALTA e WARD (1991). ARAL (1990) estendeu a utilização do controle do gradiente hidráulico a sistemas aquíferos múltiplos. Noutros modelos, a migração tem sido controlada de forma mais explícita (ALLEY (1986), DATTA e PERALTA (1986) e LEFKOFF e GORELICK (1990)). Um objectivo importante tem sido a imposição de

restrições às concentrações que existirão em determinados locais de controle em certos instantes. Um dos problemas mais complicado, de transporte a duas dimensões não-lineares que enfrentam alguns dos modelos acabados de referir, é o da optimização (em regime variável) da extracção da água contaminada de múltiplas captações, para se obter o objectivo de concentração desejado na área de extracção, principalmente quando as concentrações são função de campos de escoamento inicialmente desconhecidos, resultantes das taxas de exploração que estão a ser optimizadas.

A análise da incerteza em projectos de captura óptima de contaminantes (em águas subterrâneas) foi tratada por WAGNER e GORELICK (1987, 1989), ANDRICEVIC e KITANIDIS (1990), LEE e KITANIDIS (1991), WAGNER *et al.* (1992) e TIEDEMAN e GORELICK (1993).

MORGAN *et al.* (1993) desenvolveram uma nova técnica de programação por restrições-probabilísticas para implementar projectos de reabilitação de aquíferos. GAILEY e GORELICK (1993) desenvolveram um modelo de gestão da qualidade de águas subterrâneas para o caso de estudo do aterro sanitário de Gloucester, localizado perto de Otava, Canadá, mostrando que a optimização estocástica melhora a fiabilidade do projecto do sistema de captura obtido por uma técnica de análise determinística.

O relativamente curto horizonte temporal para o qual são estudados os esquemas de bombagem e tratamento levou a que os custos fixos incorridos na instalação das infra-estruturas necessárias a esses processos fossem tomados em consideração por muitos autores.

MCKINNEY e LIN (1995 e 1996) desenvolveram um modelo não-linear em que os custos fixos foram incorporados na função objectivo através do método dos coeficientes de penalidade. Concluíram que a consideração daqueles custos tinha um impacto significativo nos resultados, tendo usado menos furos mas de maiores dimensões.

SAWYER e AHLFELD (1995) formularam um modelo linear inteiro misto para a mesma finalidade. O método usado para a resolução foi o método "*branch-and-bound*".

MISIRLI e YAZICIGIL (1997) compararam os resultados obtidos com seis tipos de formulações diferentes deste problema (com e sem inclusão de custos fixos) e concluíram que os custos fixos deveriam ser tomados em consideração neste tipo de problemas.

A formulação realista de problemas neste contexto, em toda a sua generalidade, dá lugar a modelos não-lineares inteiros mistos. Recentemente alguns autores optaram por este tipo de

formulação. Estes modelos são de resolução complexa. Os avanços havidos no domínio da "*global optimization*" contribuíram significativamente para o desenvolvimento de métodos heurísticos apropriados à resolução de modelos com aquelas características.

Diversos autores descrevem a utilização de **algoritmos genéticos.** Salientam-se os seguintes: ROGERS e DOWLA (1992), MCKINNEY e LIN (1992, 1993, 1994), RITZEL e EHEART (1994), LEE e ELLIS (1996), HUANG e MAYER (1997) e YOON e SHOEMAKER (1999). O **método de recozimento simulado** (*simulated annealing*) foi usado por DOUGHERT e MARRYOT (1991), MARRYOT *et al.* (1993), MEYER *et al.* (1994) e LEE e ELLIS (1996). As **redes neuronais** foram consideradas nos trabalhos de EHEART *et al.* (1991), JOHNSON *et al.* (1992), RANJITHAN *et al.* (1993), RIZZO e DOUGHERTY (1992) e ROGERS e DOWLA (1992, 1994). Os **algoritmos de pesquisa Tabu** (*Tabu search algorithms*) são apresentados por LEE e ELLIS (1996).

7.6 Síntese sobre Estudos de Optimização em Portugal

Apresenta-se nesta secção uma revisão bibliográfica sobre trabalhos desenvolvidos em Portugal, ou por autores portugueses, sobre o tema Optimização em Águas Subterrâneas.

De acordo com CUNHA (1996), as águas subterrâneas constituem, sem dúvida, um importante reservatório hídrico que tem permitido responder às crescentes necessidades de água para as mais diversas utilizações. Existe uma preocupação crescente dos diferentes agentes de decisão no sentido de se proceder a uma exploração que garanta as quantidades desejadas com adequados níveis de qualidade nos locais e nos momentos apropriados. A referida preocupação deu lugar a que os diferentes técnicos envolvidos no estudo deste tema apresentassem contribuições diversas reportadas na literatura da especialidade. Da análise destas contribuições, constata-se que o processo de obtenção das decisões relativas ao planeamento e à gestão de sistemas aquíferos é um processo que se reveste de algumas dificuldades.

Em MIGLIARI e LOBO-FERREIRA (1997) apresenta-se um estudo sobre gestão optimizada de aquíferos. O estudo incluiu uma análise da literatura mundial e uma aplicação ao sistema de abastecimento de água de Palmela, na península de Setúbal.

O estudo insere-se no projecto de Investigação Aplicada do Laboratório Nacional de Engenharia Civil intitulado "Gestão Optimizada de Aquíferos", em curso no LNEC.DH.GIAS,

em 1999. Visa-se o desenvolvimento de metodologias apropriadas para avaliação e exploração optimizada de recursos hídricos subterrâneos. O projecto contou, em 1996 e 1997, com o apoio financeiro da Comissão Europeia, materializado numa bolsa de investigação atribuída no âmbito do programa Leonardo da Vinci (DGXII).

Na Parte III de MIGLIARI e LOBO-FERREIRA (1997) apresenta-se o caso-de-estudo do concelho de Palmela, para o qual se desenvolveu um modelo de gestão das águas subterrâneas do aquífero confinado da península de Setúbal (o subsistema mio-pliocénico do sistema aquífero da margem esquerda do Tejo e Sado).

Em CUNHA (1992) faz-se uma síntese histórica da aplicação das técnicas de optimização nos problemas de gestão de aquíferos.

CUNHA *et al.* (1993) analisam a exploração de um aquífero em regime não permanente, para dar resposta aos pedidos para irrigação de um perímetro agrícola (supondo existente a infra-estrutura). Existe uma função de produção agrícola que reflecte as necessidades das plantas nos diferentes períodos vegetativos, bem como os efeitos dos défices hídricos sobre a produção final (o que acarreta diminuição dos benefícios). É um problema não-linear e foi resolvido com o software MINOS.

CUNHA (1994), na sequência de CUNHA (1990), trata e resolve problemas de exploração de um aquífero para diferentes actividades (irrigação e municipal). Mostra a variação dos benefícios e dos custos de acordo com a área irrigada (nomeadamente o custo do metro cúbico de água). Mostra, também, a variação dos benefícios e dos custos da exploração realizada só para uma actividade ou para as duas actividades.

Em CUNHA e ANTUNES (1994) formula-se um problema do mesmo tipo dos anteriores, mas considera a possibilidade de para além de um aquífero poderem ser usadas águas superficiais. Foi uma primeira tentativa de usar "*simulated annealing*".

Em CUNHA (1995) trata-se um problema de escolha dos locais de captação de um dado caudal, estando o número de captações a abrir limitado. Tem como objectivo a minimização da soma dos rebaixamentos provocados pela extracção do referido caudal. É um problema linear inteiro misto e foi resolvido usando o software XPRESS-MP.

Em CUNHA (1996) referem-se os aspectos que se revestem de maior complexidade no processo de decisão presentes no planeamento e na gestão de águas subterrâneas. Esses

aspectos dizem respeito às características das equações que traduzem o escoamento subterrâneo, à incerteza que caracteriza os seus parâmetros, e à natureza dos óptimos obtidos na resolução dos modelos decisionais. Referem-se, ainda, os principais trabalhos de investigação reportados na literatura que a eles se dedicam, dando especial ênfase aos mais recentemente apresentados.

Em CUNHA (1997) trata-se um problema de escolha de locais de captação de um dado caudal, estando o número de captações a abrir limitado. Tem como objectivo a minimização dos custos de extracção do referido caudal. É um problema não-linear inteiro misto e foi resolvido usando "*simulated annealing*".

Em CUNHA e ANTUNES (1997) trata-se um problema idêntico ao do artigo anterior, mas foi adoptada uma formulação multi-objectivo, com características lineares combinatórias. Para realizar o traçado da fronteira de eficiência, foi usado software comercial (XPRESSMP) adequado à resolução deste tipo de problemas.

Em CUNHA (1999) trata-se um problema de minimização dos custos de atender às necessidades de água de um conjunto de centros populacionais, a partir das captações num aquífero As decisões a tomar dizem respeito à localização das captações, às quantidades a extrair de cada uma delas, e às infra-estruturas a construir para fazer chegar as quantidades extraídas às populações. O problema formulado é não-linear inteiro misto e é resolvido usando "*simulated annealing*"

FERREIRA DA SILVA e HAIE (1997) manifestaram a sua intenção de iniciar um projecto de investigação para preservação da qualidade das águas subterrâneas utilizando modelos de simulação e de gestão de aquíferos sujeitos à contaminação salina. Num artigo sobre o cálculo dos custos de produção de água potável FERREIRA DA SILVA *et al.* (1998) fazem uma breve referência à aplicação de técnicas de optimização, referindo que o tema constitui tarefa preliminar para a definição dos elementos de base necessários aos modelos de gestão. Finalmente FERREIRA DA SILVA *et al.* (1999) desenvolvem o tema custos instantâneos de "produção" de água potável, com especial enfoque nos sistemas com origens afectadas por intrusão salina.

Está em curso desde 1998, por um período de três anos, um protocolo estabelecido entre o **Instituto da Água** e o **Instituto Superior Técnico** que visa a restruturação e a **optimização das redes de monitorização de águas subterrâneas** existentes em Portugal Continental, nas

vertentes de quantidade e de qualidade, visando ainda a extensão da monitorização a zonas onde se verificam lacunas de informação (*cf.* CUPETO e LOPES, 1999).

8. CONCLUSÕES

8.1 Sumário

Apresentaram-se nas secções anteriores os avanços científicos registados nos últimos anos na aplicação da abordagem de Simulação/Optimização (**S/O**) a problemas de gestão e planeamento de águas subterrâneas, tendo-se dado especial atenção aos modelos de **S/O** que explicitamente englobam nos seus objectivos a gestão da qualidade de águas subterrâneas.

GORELICK (1983) foi apresentado de uma forma mais desenvolvida, por forma a se poder:

- delinear a investigação desenvolvida nos anos setenta e os resultados então alcançados;
- comparar os desenvolvimentos recentes com o estado-da-arte há quinze anos;
- verificar se os desenvolvimentos recentes seguiram na linha subjacente às considerações e sugestões de investigação sugeridas.

Em particular salientámos anteriormente os esforços de investigação tendentes a:

- resolver os problemas da não-linearidade do controle hidráulico de águas subterrâneas;
- tomar em consideração os parâmetros de incerteza de águas subterrâneas nos modelos de controle hidráulico optimizado;
- incluir nos modelos de gestão do abastecimento por águas subterrâneas tanto os aspectos quantitativos como os aspectos qualitativos.

Nos últimos quinze anos, a aplicação dos **métodos de incorporação** e da **matriz de resposta** (*embedding* e *response matrix*) foi progressivamente estendido aos problemas da gestão do abastecimento por águas subterrâneas, caracterizados por:

- aumento da dimensão espacial e temporal;
- aumento do nível de complexidade dos cenários da gestão e dos objectivos.

Os problemas da gestão do abastecimento por águas subterrâneas em larga escala e/ou de

sistemas multi-aquíferos ao longo de períodos de tempo mais dilatados foi já resolvido. As técnicas de programação multi-objectivos foram usadas para o desenvolvimento das estratégias de compromisso entre várias alternativas de gestão e ainda para realçar a eficácia do processo de decisão.

Devido às grandes necessidades de armazenamento em memória de computador e às dificuldades numéricas e/ou às instabilidades, o **método de incorporação** foi inicialmente usado para modelos de pequena dimensão, em regime permanente, enquanto que o método da matriz de resposta foi considerado mais prático para sistemas a maior escala. As dificuldades inerentes à aplicação das técnicas do **método de incorporação**, que nunca chegaram a ser muito usadas, não ficaram solucionadas com o estudo de TUNG e KOLTERMANN (1985). Pelo contrário, os autores ilustrando experiências computacionais realizadas com o método de incorporação para a gestão e o planeamento de aquíferos confinados desincentivaram a sua aplicação. Nos últimos anos, acoplado com a programação multi-objectivos, também o método de incorporação mostrou ser uma ferramenta viável para a resolução de problemas de planeamento complexos e de grande dimensão.

Um estudo do início da década de noventa (PERALTA *et al.*, 1991a), comparou os tempos de cálculo em computador e as necessidades de memória tanto para o método da matriz de resposta como para o método de incorporação. Os autores concluíram que se houver uma grande percentagem de células com extracções, ou se se tiver de restringir ou de calcular no modelo muitas alturas piezométricas, o método de incorporação é preferível.

Dedicou-se já um grande esforço de investigação à gestão optimizada de sistemas aquíferos confinados e ao controle óptimo aplicado a problemas em que são usadas representações não-lineares das águas subterrâneas. A abordagem preferida pela maioria dos autores permaneceu sendo a aliança entre a Programação Linear e várias técnicas de linearização, dentro de esquemas iterativos.

Um esquema cíclico inovador foi proposto por TAKAHASHI e PERALTA (1995) para o cálculo de estratégias de extracção óptima sustentáveis, a partir de sistemas aquíferos multi-camadas, com:

- escoamentos confinados ou livres;
- escoamentos diversos descritos por equações lineares por patamares (*piecewise-linear*).

Os estudos anteriores, baseados no método de incorporação ou no método da matriz de

resposta, têm negligenciado as não-linearidades postas pelos diversos processos de escoamento, como a evapotranspiração, a descarga de furos artesianos, a descarga por drenagem, assumindo que não interagem significativamente com as bombagens.

Alguns estudos identificaram já problemas relacionados com métodos de solução por **Programação Dinâmica**:

- limites de dimensionalidade no número das variáveis de decisão;
- escrita de um problema separado para cada novo problema;
- os objectivos de projecto são de difícil incorporação uma vez que a função objectivo tem de ser separável em relação aos estádios do modelo de Programação Dinâmica.

WILLIS e YEH (1987) sugeriram que o uso da Programação Dinâmica é mais útil quando o sistema de águas subterrâneas pode ser representado por um parâmetro agregado homogéneo.

JONES *et al.* (1987) apresentaram uma versão modificada de Programação Dinâmica, a que chamaram o Método da Programação Dinâmica Diferencial, que pode tratar um grande número de variáveis de estado sem discretizar ambas as variáveis de estado e de decisão o que, consequentemente, reduz a dimensão do problema. JONES *et al.* (1987) mostraram que:

- as necessidades computacionais para resolver a Programação Dinâmica diferencial são pelo menos uma ordem de grandeza menores do que a dos modelos de optimização incorporados convencionais;
- as necessidades de memória central da Programação Dinâmica diferencial são muito menores que as dos modelos convencionais de optimização de águas subterrâneas.

Só muito recentemente se desenvolveram esforços significativos para a formulação de modelos de gestão de águas subterrâneas que têm a capacidade de considerar a natureza aleatória dos escoamentos dos sistemas subterrâneos e de derivar as soluções de gestão correspondentes.

Alguns estudos mostraram a relativa insensibilidade das soluções de gestão a variações das características do aquífero. Outras análises de sensibilidade (*cf.* LOACIGA e MARINO, 1987) mostraram que:

- premissas clássicas, bayesianas, e determinísticas conduzem a soluções analíticas de gestão diferentes (numericamente, a diferença entre tais soluções depende da covariância da

estimativa do parâmetro);

- as considerações feitas sobre a distribuição dos parâmetros de águas subterrâneas e a covariância dos indicadores de amostragem mostraram ser a distribuição o parâmetro dominante nos factores de incerteza que afectam as soluções de gestão de águas subterrâneas.

Modelos de optimização por restrições-probabilísticas foram desenvolvidos para um aquífero confinado, homogéneo e não-uniforme por TUNG (1986) e para um sistema *rio-aquífero* por HANTUSH (1959). O modelo estocástico de TUNG (1986) considerou explicitamente a natureza aleatória da transmissividade T e do coeficiente de armazenamento S, usando uma análise de primeira-ordem para estimar as propriedades estatísticas da função de resposta e do rebaixamento em cada ponto de controle, invocando o teorema do limite central para assumir uma distribuição normal dos rebaixamentos. Diversas corridas do modelo demostraram quais os factores que afectam os seus resultados. Obtiveram-se as seguintes conclusões:

- o volume máximo de bombagem aumenta à medida que diminuem as incertezas e aumenta a fiabilidade nas propriedades do aquífero;
- dever-se-ia fazer um esforço acrescido para se avaliar melhor a transmissividade do aquífero incluindo a sua variabilidade, enquanto que o coeficiente de armazenamento num processo de modelação pode ser considerado como determinístico e a sua precisão não é crucial;
- quando a incerteza da transmissividade é moderadamente grande, tanto a estimativa das propriedades estatísticas do rebaixamento aleatório (usando uma análise de primeira ordem) como a premissa da normalidade podem não ser válidas.

O modelo estocástico de HANTUSH e MARINO (1989) considerou requisitos probabilísticos para o desempenho específico do sistema e incorporou explicitamente a natureza aleatória da condutividade hidráulica K e da cedência específica S_y de um aquífero livre, que se assumiu como tendo comportamento segundo uma distribuição log-normal. Fez-se uma aplicação do modelo a um cenário. A sensibilidade dos resultados foi examinada variando requisitos probabilísticos e propriedades estatísticas dos parâmetros do aquífero. Os resultados obtidos pelo modelo indicaram que:

- os padrões óptimos de bombagem obtidos são muito sensíveis aos coeficientes da distribuição de probabilidades, incluindo o coeficiente de variação do logaritmo da

condutividade hidráulica;

- a taxa induzida de recarga fluvial não é sensível ao coeficiente de variação da cedência específica, mas é altamente sensível aos níveis de probabilidade;
- a taxa induzida de recarga fluvial é altamente sensível aos valores estatísticos da condutividade hidráulica.

GEORGAKAKOS e VLATSA (1991) formularam um modelo estocástico total para o controle de um sistema aquífero confinado de duas camadas, com diversas condições de fronteira e níveis de incerteza, usando a programação estocástica e incorporando as incertezas da variável regional transmissividade e das condições de fronteira, com recurso ao método das pequenas perturbações. Uma extensão desse trabalho foi posteriormente sugerida para se poderem considerar também as incertezas da estimação, usando uma abordagem geoestatística.

Actualmente estão a ser desenvolvidos modelos de gestão do abastecimento por águas subterrâneas que são capazes de considerar em conjunto e explicitamente tanto a cedência do aquífero como a qualidade das águas subterrâneas, pondo os requisitos de qualidade das águas subterrâneas nas restrições ou na função objectivo.

Por outro lado, o modelo de gestão do abastecimento por águas subterrâneas pode fazer com que se alcance o objectivo da satisfação das necessidades de água ao mesmo tempo que se preservam os padrões de qualidade das águas subterrâneas, modificando regimes de bombagem de tal modo que a configuração resultante das zonas de captura minimizem potenciais riscos de contaminação dos recursos hídricos subterrâneos por fontes de poluição existentes (VARLJEN e SHAFER, 1993).

Assim, as estratégias de utilização optimizada de águas subterrâneas podem contribuir para nos aproximarmos da situação óptima no abastecimento de água, ao mesmo tempo que mais explicitamente se atingem as metas desejadas para a qualidade das águas subterrâneas.

Devido à não-linearidade da equação da convecção-dispersão, é difícil (computacionalmente) optimizar as taxas de extracção de águas subterrâneas e atingir concentrações de solutos especificadas, sempre que as alturas piezométricas, as velocidades do escoamento subterrâneo e a qualidade da água extraída também fazem parte das incógnitas do problema. Os métodos para resolver este problema são os seguintes:

- controle do gradiente hidráulico;
- técnica dos coeficientes de influência de concentrações;
- restrições incorporadas explícitas descrevendo a resposta da concentração à exploração.

Já em meados da década de noventa, PERALTA *et al.* (1995a) apresentaram uma alternativa da abordagem hierárquica para o cálculo de estratégias de gestão de águas subterrâneas em regiões com contaminantes dispersos. Esta abordagem, denominada MODCON, é alternativa porque utiliza uma nova *programming-based modification* da equação do transporte de massa. Em certo sentido é uma abordagem hierárquica uma vez que a estratégia volumétrica óptima é primeiramente calculada para uma área de estudo e só é modificada em função da necessidade de se atingirem os objectivos de qualidade da água.

Uma classe particular de problemas de gestão da qualidade de águas subterrâneas surge com a exploração de aquíferos costeiros. Enquanto que uma série de modelos numéricos de simulação foram desenvolvidos para a análise e previsão de sistemas de aquíferos costeiros, a bibliografia relevante de modelos de **S/O** aplicados ao tema é ainda muito restrita. Em qualquer caso, embora utilizando o pressuposto de uma interface brusca para estudar o movimento da interface águas doces - águas salgadas, foi já demonstrada a exequibilidade da abordagem do controle óptimo a problemas de intrusão salina que ocorrem em grandes sistemas de aquíferos livres multi-camada ou de aquíferos confinados.

Muitas das simplificações introduzidas, no passado, para representar os aspectos relativos à localização e escolha de infra-estruturas hidráulicas e respectivos custos fixos em modelos de optimização têm vindo a ser ultrapassadas. Tem-se optado progressivamente por formulações mais realistas, dando lugar a modelos não-lineares inteiros mistos, cuja resolução tem sido realizada com o recurso a métodos heurísticos (**algoritmos genéticos, método do recozimento simulado, redes neuronais** e **algoritmos de pesquisa Tabu**).

8.2 Sugestões para Linhas de Investigação Futuras

O sucesso do método da **matriz de resposta** (MR) deveu-se à sua capacidade de reduzir ao essencial os elementos dos problemas de gestão de águas subterrâneas que não podiam, computacionalmente, ser implementados de acordo com a formulação dada pelo **método de incorporação** (EM). Com o desenvolvimento actual de poderosos sistemas computacionais não há desvantagens do ponto de vista numérico para não se preferir o **método de**

incorporação em favor do método da matriz de resposta. O método de incorporação é conceptualmente mais elegante e mais simples do que o método da matriz de resposta e, adicionalmente, dá mais informação em relação ao comportamento do sistema.

A gestão de sistemas de águas subterrâneas não-lineares foi bem resolvida por diversas técnicas, mais dentro do campo dos algoritmos da **Programação Linear** do que no campo da **Programação Não-Linear**. Estas técnicas, pelo contrário, podem ser ferramentas eficazes para tratar problemas de gestão de águas subterrâneas com funções objectivo não-lineares.

As novas heurísticas anteriormente citadas começaram a ser recentemente aplicadas abrindo todo um campo de investigação que permitirá a resolução mais realista dos modelos formulados.

As maiores limitações correntes dos modelos disponíveis de **S/O**, pelo menos na área do abastecimento por águas subterrâneas, parece ser o relacionado com a sua aplicação num quadro determinístico. Aplicações estocásticas ou do tipo *chance-constrained*, incorporando parâmetros de incerteza relativos às águas subterrâneas e às condições de fronteira, ainda têm sido pouco aplicados. Em consequência, a abordagem óptima para a tomada de decisões em águas subterrâneas não é adequada à filosofia emergente baseada no risco, em questões relativas a projectos de engenharia com componentes hidrogeológicas. Na verdade num esquema de optimização do tipo *chance-constrained*, é admitida a probabilidade de se falhar uma restrição, mas não é usualmente acoplado o custo de insucesso em termos monetários. Em resumo, sem o desenvolvimento de investigação apropriada dirigida para a remoção destas limitações, outras ferramentas de tomada de decisão, menos gerais mas mais versáteis e adaptadas a abordagens do tipo *risk-balancing*, poderão vir a ser preferidas.

Outra área de investigação, ainda sub-estimada, é a da integração em modelos únicos, da gestão do abastecimento por águas subterrâneas e da gestão da qualidade das águas subterrâneas para a determinação de estratégias de utilização de águas subterrâneas que juntem à satisfação óptima das necessidades de água a satisfação das restrições ou dos objectivos especificados de qualidade das águas subterrâneas. Na verdade, a investigação sobre o tema da gestão da qualidade das águas subterrâneas, ligada à necessidade das acções de reabilitação de aquíferos, recebeu um grande impulso na última década. Um esforço de investigação equivalente deveria ser feito para permitir o cruzamento de considerações de qualidade de águas subterrâneas com as do contexto de engenharia do abastecimento por águas subterrâneas, uma vez que seria melhor evitar a degradação da qualidade das águas

subterrâneas em vez de se ter de implementar estratégias de reabilitação posteriores. Esta necessidade é particularmente sentida na exploração de aquíferos costeiros.

Na Fig. 5.6 apresenta-se uma representação esquemática das principais linhas de investigação que, de acordo com MIGLIARI e LOBO-FERREIRA (1997), merecem apoio na área da **S/O** para gestão do abastecimento por águas subterrâneas.

O acesso à base de dados efectuou-se após a selecção de palavras-chave. Partiu-se ainda do pressuposto que a quantidade de informação disponível na base seria representativa da produção científica das diferentes áreas da gestão de águas subterrâneas, permitindo quantificar e comparar as linhas de investigação, suas tendências e interesses ao longo de três décadas, tanto em relação aos estudos de águas subterrâneas como aos mais restritamente dedicados apenas à área da gestão de águas subterrâneas.

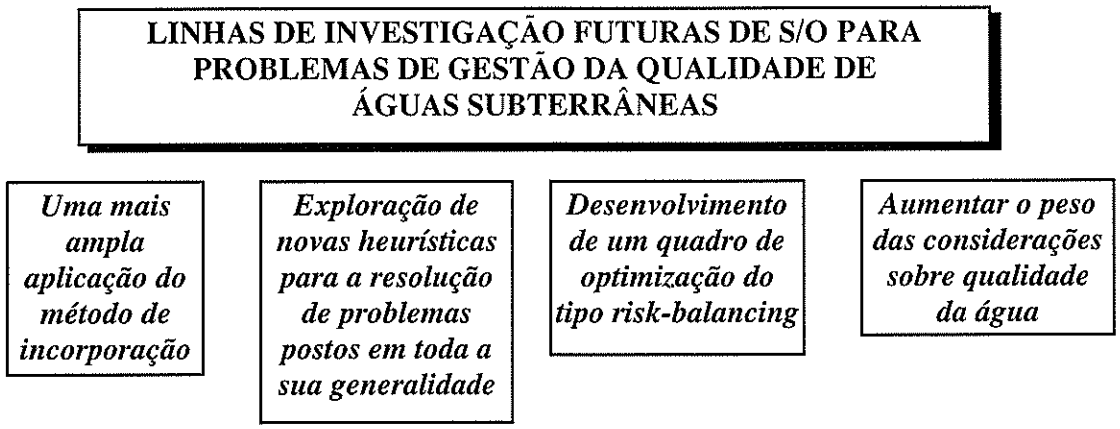


Fig. 5.6 - Linhas de investigação futuras de S/O para problemas de gestão da qualidade de águas subterrâneas, baseadas nas sugestões de MIGLIARI e LOBO-FERREIRA (1997)

É evidente que esta avaliação quantitativa não pode ser considerada exaustiva, pretendendo apenas reflectir os resultados alcançados na revisão bibliográfica feita, e nas palavras-chave seleccionadas. Adicionalmente, deve-se referir que os últimos dois ou três anos (1997-1999) normalmente estão ainda incompletos nas bases de dados bibliográficas.

No esquema da Fig. 5.7 mostra-se a combinação de palavras-chave (em inglês) efectuadas na pesquisa realizada à base de dados. No Quadro 5.2 apresentam-se os resultados numéricos de cada combinação de palavras-chave (em inglês), isto é, o número de estudos registados para cada uma das áreas pesquisadas.

Com base nos resultados da pesquisa bibliográfica feita, MIGLIARI e LOBO-FERREIRA

(1997) desenvolveram uma visualização gráfica para análise da evolução das tendências de investigação em optimização, no tempo.

Nas Figs. 5.8 e 5.9 exemplificam-se os tipos de análise desenvolvida pelos autores. Dessas figuras podem-se tirar as seguintes conclusões:

- internacionalmente, na última década, o interesse pela investigação sobre gestão de águas subterrâneas para abastecimento foi claramente mais baixo, embora pareça ter ganho novo impulso nos dois últimos anos do período em análise (Fig. 5.9);
- internacionalmente, a produção científica sobre gestão de água subterrânea aplicada à reabilitação de aquíferos e à gestão da qualidade das águas subterrâneas mostra uma tendência de constante e gradual aumento (Figs. 5.8 e 5.9).

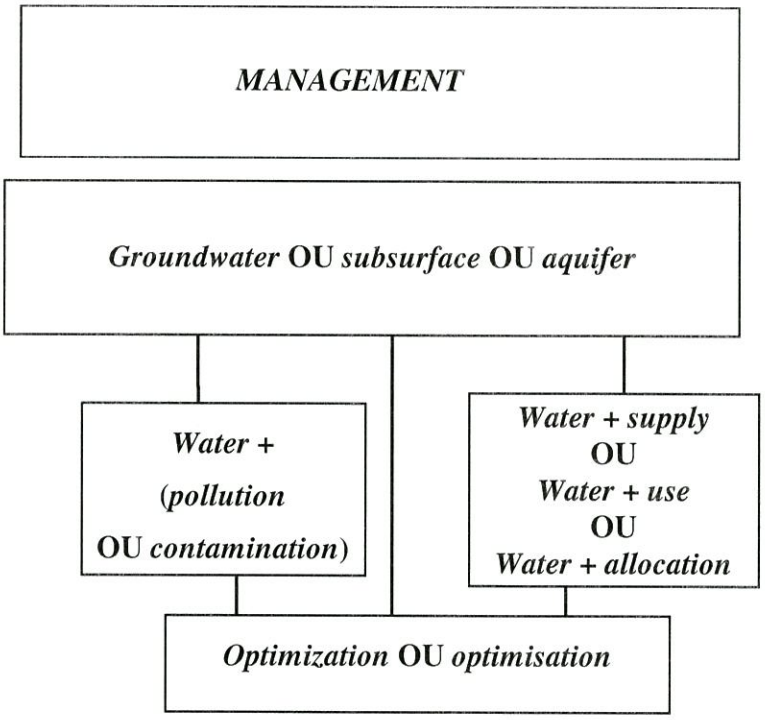


Fig. 5.1 - Combinação das palavras-chave usadas

Quadro 5.1 - Número de estudos de cada combinação de palavras-chave

Combinação de palavras-chave	Número total de estudos (1967-1996)
GW	**59850**
GW + MAN	**17409**
GW + MAN + WS	**3477**
GW + MAN + WP	**5806**
GW + MAN + OPT	**234**
GW + MAN + WS + OPT	**98**
GW + MAN + WP + OPT	**129**

Legenda:
GW = **groundwater OU subsurface OU aquifer;** MAN = **management**
WP = **water + (pollution OU contamination)**
WS = **(water + supply) OU (water + use) OU (water + allocation)**
OPT = **optimization OU optimisation**

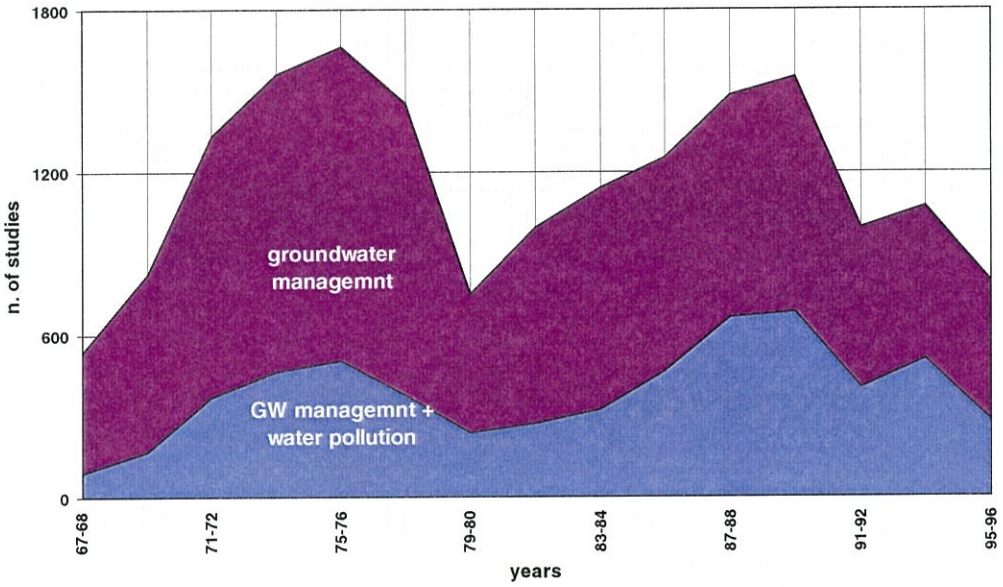
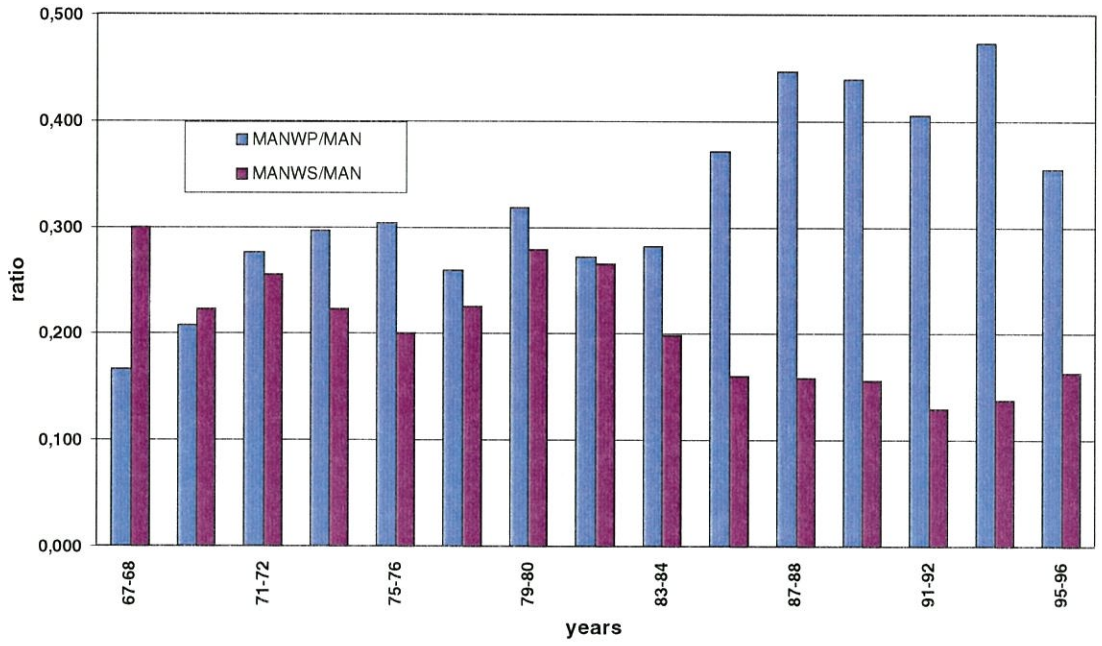


Fig. 5.2 - "Peso" da investigação sobre gestão de águas subterrâneas aplicada a problemas de poluição das águas subterrâneas comparada com toda a investigação sobre gestão de águas subterrâneas



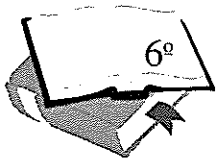
Legenda:

1. **MANWP/MAN: Rácio entre o número de estudos sobre gestão de águas subterrâneas aplicada a problemas de poluição da água e o número de estudos de toda a gestão de águas subterrâneas**

2. **MANWS/MAN: Rácio entre o número de estudos de gestão do abastecimento por águas subterrâneas em relação ao número total de estudos sobre gestão de águas subterrâneas**

Fig. 5.3 - Evolução das tendências de investigação em optimização de águas subterrâneas

CAPÍTULO SEXTO



A INVESTIGAÇÃO RECENTE SOBRE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM PORTUGAL

Resumo do Capítulo

Este capítulo foi dividido em duas partes. Na Parte I apresenta-se, com base na síntese de LOBO-FERREIRA (1998), um relato dos estudos de âmbito "Temático", apresentados durante o "Seminário sobre Águas Subterrâneas", organizado pela Associação Portuguesa dos Recursos (APRH), em Dezembro de 1997, e durante o "4º Congresso da Água", também organizado pela APRH, em Março de 1998. Foram discutidos mais de meia centena de comunicações no Tema 5 do Congresso, sobre "Águas Subterrâneas". Na Parte II apresenta-se

o relato dos estudos de âmbito "Regional", discutidos durante os referidos Seminário e Congresso.

A concretização da **Sessão Especial sobre Águas Subterrâneas**, o Tema 5 do 4º Congresso da APRH, em Março de 1998, permitiu a análise e discussão do vasto trabalho em desenvolvimento em todas as regiões do País, nomeadamente dos estudos iniciados nos últimos dois anos, após o 3º Congresso da Água, realizado em Abril de 1996.

Neste capítulo, extraem-se e sintetizam-se os aspectos considerados mais relevantes, inovadores e actuais nos domínios da investigação aplicada, do ensino, do projecto e exploração de captações e de análise de legislação.

Realça-se a profundidade de análise das muitas áreas em que se pode desdobrar a componente científica das Águas Subterrâneas e a enorme capacidade de trabalho demonstrada pelos nossos especialistas em Águas Subterrâneas. Salienta-se a importância e o número das comunicações referentes ao Estudo dos Recursos Hídricos Subterrâneos do Alentejo (quinze), que se desenvolve desde o último trimestre de 1996 e se estenderá, presumivelmente, até finais do ano 2000.

A INVESTIGAÇÃO RECENTE SOBRE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM PORTUGAL

1. INTRODUÇÃO

Este capítulo foi dividido em duas partes. Na Parte I apresenta-se, com base na síntese de LOBO-FERREIRA (1998), um relato dos estudos de âmbito "Temático", apresentados durante o "Seminário sobre Águas Subterrâneas", organizado pela Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos (APRH), em Dezembro de 1997, e durante o "4º Congresso da Água", também organizado pela APRH, em Março de 1998, onde foram discutidos mais de meia centena de comunicações no Tema 5 do Congresso sobre "Águas Subterrâneas". Na Parte II apresenta-se o relato dos estudos de âmbito "Regional", discutidos durante os referidos Seminário e Congresso.

Extraem-se e sintetizam-se os aspectos considerados mais relevantes, inovadores e actuais das águas subterrâneas, nos domínios da investigação aplicada, do ensino, do projecto e exploração de captações e de análise de legislação, da mais de meia centena de comunicações apresentadas ao 4º Congresso da Água sobre Águas Subterrâneas.

Foi com muito agrado que se procedeu a esta tarefa. Tal permitiu a análise do vasto trabalho em desenvolvimento em todas as regiões do País, desde o 3º Congresso da Água, realizado em Abril de 1996. Realça-se a profundidade de análise das muitas áreas em que se pode desdobrar a componente científica das Águas Subterrâneas e a enorme capacidade de trabalho demonstrada pelos nossos especialistas em Águas Subterrâneas. Salienta-se a importância e o número das comunicações referentes ao Estudo dos Recursos Hídricos Subterrâneos do Alentejo - ERHSA (quinze), que se desenvolve desde o último trimestre de 1996 e se estenderá, presumivelmente, até finais do ano de 2000.

A concretização da Sessão Especial (Tema 5) sobre Águas Subterrâneas, vem também coroar o trabalho desenvolvido nos últimos quinze anos pela **Comissão Especializada de Águas Subterrâneas da APRH, de que o autor foi membro de 1982 a 1986 e Presidente de**

Fevereiro de 1990 a Abril de 1992, nomeadamente organizando e fomentando a apresentação de comunicações aos Seminários bienais sobre Águas Subterrâneas, que se têm realizado com antecedência de alguns meses em relação aos Congressos da Água da APRH.

Em paralelo a sociedade civil começa a ter conhecimento do nosso trabalho. A título de exemplo cita-se o texto publicado no Diário de Notícias (de autoria de Humberto Vasconcelos) relativo ao Dia Nacional da Água, de 1 de Outubro de 1997: "O Dia Nacional da Água era, até há pouco tempo, mais um dia de lamentos e críticas. Mas hoje, em que a data volta a ser comemorada, já há motivos para alegrias, embora estejamos ainda muito longe da data em que será uma grande festa. O Plano Nacional da Água vai-se estruturando, os planos de bacia dos rios nacionais e internacionais já estão a ser elaborados, **o estudo dos lençóis freáticos é já uma realidade**. Mas muito há ainda por fazer..."

2. ORGANIZAÇÃO DO CAPÍTULO

Para facilitar a leitura e a organização deste capítulo, dividiu-se a revisão bibliográfica efectuada em duas Partes:

- Parte I: Estudos de âmbito essencialmente "Temático": Geoestatística; Geofísica; Geotermia; Impacto Ambiental de Actividades Antrópicas; Captações/legislação; Zona Não-Saturada; Aquíferos Cársicos; Recarga Artificial; Vulnerabilidade à Poluição; Monitorização.
- Parte II: Estudos de âmbito essencialmente "Regional": Estudo dos Recursos Hídricos Subterrâneos do Alentejo - ERHSA; Açores; Aveiro; Ribatejo, Oeste e Vale do Tejo; Algarve; Madeira e Porto Santo; Minho; Beiras; Trás-os-Montes.

PARTE I : ESTUDOS DE ÂMBITO ESSENCIALMENTE "TEMÁTICO"

3. ESTUDOS DE ÂMBITO ESSENCIALMENTE "TEMÁTICO"

3.1 Introdução

Apresenta-se nesta secção o relato relativo aos estudos de âmbito essencialmente "Temático": Geoestatística; Geofísica; Geotermia; Impacto Ambiental de Actividades Antrópicas; Captações/legislação; Zona Não-Saturada; Aquíferos Cársicos; Recarga Artificial; Vulnerabilidade à Poluição; Monitorização.

Apresentam-se em seguida as comunicações deste sub-tema realçando, com base nos textos apresentados pelos autores (em *itálico*) as passagens mais descritivas do trabalho desenvolvido. Pela novidade do ERHSA dá-se relevo especial à apresentação de extractos dos textos originais.

3.2 Geoestatística

- **Probabilidades e Probabilidades Condicionais em Hidrogeologia**: por Luís Ribeiro

O autor apresenta um corpo de técnicas geoestatísticas que permitem detectar e modelar os padrões da dependência espacial dos atributos assim como avaliar o risco associado, com base no arranjo mútuo das indicatrizes previamente construídas. A comunicação apresentada facilita a obtenção de respostas relacionadas com as seguintes questões:

1 - Qual é a probabilidade de, num certo local desconhecido, a concentração do poluente exceder o Valor Máximo Admissível ?

2 - Qual é a probabilidade de encontrar a uma distância h, no domínio de valores $\geq z_1$ *, um valor* $\geq z_2$ *?*

3 - Qual é a probabilidade de encontrar a uma distância h, no domínio de valores $< z_2$ *, um valor* $< z_1$ *?*

Da sua comunicação salientam-se as seguintes conclusões:

Os mútuos arranjos das indicatrizes (tipo mosaico, tipo difusão ou tipo resíduos) caracterizados pelos padrões espaciais definidos pelos respectivos variogramas e co-variogramas têm ligações óbvias com a geometria da pluma de poluição e com implicações importantes ao nível da selecção do tipo de técnica a aplicar nas operações de estimação: Krigagem simples das indicatrizes, Krigagem dos resíduos das indicatrizes ou Krigagem

Disjuntiva.

As técnicas geoestatísticas permitem apresentar outro tipo de mapas também de grande utilidade: Os mapas de risco de má classificação nas áreas potencialmente perigosas ou os mapas dos quantis das concentrações de cloretos respeitantes a probabilidades pré-fixadas.

Por último os mapas de risco podem ser instrumentos fundamentais nos critérios de optimização de redes de monitorização, com base na identificação naquelas zonas onde existe uma rápida passagem de áreas de grande probabilidade para zonas de pequena probabilidade de exceder o valor limite fixado.

- **Modelação Estocástica de Escoamentos em Aquíferos. Simulações de Monte-Carlo Condicionadas:** por Manuel M. Pacheco Figueiredo, Luís Ribeiro e José M. P. Ferreira Lemos

Os autores comparam resultados de modelos de escoamento em meios porosos obtidos pelo Método dos Elementos Finitos com dados de entrada relativos aos valores da transmissividade regional obtidos (1) por *simulações de Monte-Carlo condicionadas* e (2) produzidos pelas *simulações correspondentes à distribuição "real" da transmissividade e às estimativas desta por krigagem e por valor efectivo.* As conclusões apresentadas são as seguintes:

A primeira consiste em considerar inconveniente a modelação do escoamento com base no designado "valor efectivo" da transmissividade quando existirem dados geograficamente localizados. De facto, uma adequada análise estrutural dos dados permitirá uma estimativa da transmissividade por krigagem, com base na qual se poderá simular numericamente o escoamento e obter melhores resultados.

Caso se pretenda estimar as variáveis em jogo e, simultaneamente, avaliar a incerteza associada dever-se-á optar pelas simulações de Monte-Carlo condicionadas aos dados disponíveis. Este método, apesar de exigir um grande esforço computacional, tem a vantagem de ser conceptualmente simples e versátil, na medida em que reconhece "automaticamente" as características dos problemas, tais com a geometria do domínio e as condições fronteira.

Finalmente, importa referir que as amostras de transmissividades utilizadas nestes exemplos apresentam uma boa cobertura do domínio, quer em número de dados quer na distribuição espacial destes. Contudo, questões como a diminuição da distância integral da transmissividade para os mesmos pontos amostrados ou a redução do número de dados e as correspondentes implicações na perda de qualidade dos resultados não são tratadas (na comunicação). *Também não é analisada a incerteza dos parâmetros estatísticos obtidos ou adoptados a partir das amostras* (m_Y, σ^2_Y, w, I_Y) *e a consequente implicação na incerteza dos resultados obtidos.*

- **Modelos de Representação Global para Caracterização de Sistemas Aquíferos Cársicos:** por Luís Ribeiro; Leopoldo Cortez; Fernando Durão e Ana Rita Lopes

Os autores efectuam *uma breve análise a duas metodologias, ambas baseadas em representações globais de aquíferos, usualmente designadas por modelos de "caixa preta" (função de transferência linear e redes neuronais artificiais), e* comparam *os resultados obtidos, em termos de estimação do nível piezométrico no sistema aquífero Silves-Querença, tendo como dados de partida a precipitação diária na região Algarvia.* Da sua comunicação salientam-se as seguintes conclusões: *Os resultados obtidos neste estudo preliminar indicam que ambos os modelos são potencialmente robustos e revelam-se como importantes ferramentas de previsão do comportamento de sistemas aquíferos cársicos. Salienta-se ainda a sua utilidade como auxiliares nas decisões de planeamento e gestão de águas subterrâneas. O estudo irá continuar numa perspectiva de testar outras aproximações.*

- **Influência da Heterogeneidade na Modelação da Poluição de Aquíferos em Meios Porosos. O Caso de Vale de Milhaços:** por Vitor G. Oliveira e Luís Ribeiro

Os autores articulam técnicas não paramétricas de estimação com um modelo de escoamento e transporte de água subterrânea, tendo em vista proceder a uma avaliação preliminar da contaminação de um sub-sistema aquífero relacionado com um aterro sanitário. Abordam diversas questões relativas aos sistemas aquíferos da península de Setúbal, nomeadamente a modelação matemática da poluição causada por um aterro sanitário. Da sua comunicação salientam-se as seguintes conclusões:

Uma das principais limitações deste trabalho, senão a principal, resulta da falta de uma rede de monitorização - através da qual seria possível, em cada momento, proceder ao controlo de poluição do sub-sistema aquífero - o que inviabiliza uma abordagem determinística do problema em estudo.

A abordagem do problema foi, portanto, efectuada recorrendo a técnicas do domínio da Geoestatística. Assim se explica a utilização das simulações estocásticas no decurso do presente trabalho: estas permitiram proceder a uma análise da incerteza associada à distribuição do poluente estudado.

No trabalho apresentam-se dois cenários, igualmente prováveis, de dispersão da pluma poluente. Tais cenários (e outros, que podem vir a construir-se) podem utilizar-se com vista à eventual implementação de uma rede de monitorização, situando-a, por exemplo, nas malhas em que existe maior probabilidade de se exceder determinado limite de concentração.

- **A Morfologia Matemática na Arquitectura dos Sistemas Hidrogeológicos:** por Pedro Pina; Luís Ribeiro e Fernando Muge

Os autores também abordam diversas questões relativas aos sistemas aquíferos da península de Setúbal (área de Vale de Milhaços), apresentando um desenvolvimento teórico e integrando técnicas geoestatísticas e operadores de morfologia matemática. Da sua

comunicação salientam-se as seguintes conclusões:

A metodologia foi aplicada em 2 fases distintas numa área do aquífero superficial da península de Setúbal. Numa primeira fase, foi construído um modelo de intercorrelação espacial entre unidades hidro-estratigráficas que permita analisar a sua dependência estrutural, as anisotropias geométricas e outras características estruturais dos depósitos geológicos. Este modelo serviu para construir por simulação condicional com base nos dados litológicos disponíveis, diversas imagens das unidades hidrogeológicas com incerteza associada. Numa segunda fase e com o auxílio de técnicas da Morfologia Matemática, melhorou-se o modelo, pela integração do grafo de relações de vizinhança entre unidades, estimando desse modo a conectividade entre elas e identificando os corpos aquíferos isolados.

- **Aplicação de uma Técnica Mista de Análise em Componentes Principais e Variografia à Classificação do Comportamento de Piezómetros**: por Ana Cristina Buxo e Luís Ribeiro

Os autores tratam uma significativa quantidade de dados da área mineira de Neves Corvo, utilizando técnicas genericamente designadas por Análise Factorial *que podem ser aplicadas para a determinação de graus de semelhança/diferença entre amostras e/ou entre propriedades (variáveis).* Da sua comunicação salientam-se as seguintes conclusões:

Com o objectivo de estudar a evolução deste sistema aquífero e em particular do impacte da exploração mineira no sub-sistema profundo, foi analisada a evolução da superfície piezométrica ao longo de um período de 12 anos. A rede de observações piezométrica cobre uma área de cerca de 5 km^2 e é constituída por cerca de 200 piezómetros para os quais existe um total de quase 5200 medições efectuadas ao longo de um período de 12 anos.

Os métodos de classificação de dados, embora insensíveis à informação específica e empírica que se tem sobre o meio em estudo, são uma primeira abordagem eficaz e rápida, constituindo um bom ponto de partida para a interpretação do sistema aquífero.

A aplicação da ACP sobre os variogramas temporais demonstrou ser capaz de identificar algumas características fundamentais do sistema aquífero e substitui, com alguma vantagem, o mesmo tipo de análise sobre as séries piezométricas, geralmente descontínuas e dificilmente simultâneas para todos os piezómetros.

Este tipo de técnica poderá mesmo servir de base à definição de índices de agitabilidade/estabilidade dos piezómetros e os resultados obtidos podem depois ser cartografados e cruzados com outros tipos de informação geológica, estrutural ou geomorfológica, para permitir a sua validação e explicação.

- **Caracterização Geostatística da Contaminação Salina por Dissolução de Evaporitos - Um Caso na Zona da Maragota**: por Luís Ribeiro; Ana C. Santos e Jorge Dias da Silva

Os autores aplicam uma metodologia geostatística não paramétrica com o objectivo de avaliar a extensão da poluição e a identificação das fontes de poluição na área de Maragota no Algarve. Da sua comunicação salientam-se as seguintes conclusões:

O estudo da contaminação salina baseou-se em 163 amostras de cloretos, recolhidas durante o inventário de 1980-81 em captações com profundidades médias de 60 m. Os pontos estão regularmente distribuídas por uma zona de extensão 7 km por 10 km, cobrindo a área em estudo e as suas vizinhanças.

...foi aplicada uma metodologia geostatística não paramétrica (segundo o formalismo da indicatriz) sobre dados de cloretos observados no campo e anomalias geofísicas detectadas por intermédio de um magnetómetro de precessão de protões.

Os mapas de risco que resultam da aplicação dessas metodologias, isto é as cartas de probabilidades que a concentração de certo parâmetro exceda um certo valor limite, mostram claramente que a área com grandes anomalias magnéticas coincide com a zona de maiores anomalias salinas.

Estas cartas são indiscutivelmente, documentos importantes para as tomadas de decisão ao nível do Planeamento e Gestão dos Recursos Hídricos Subterrâneos, tornando-se ferramentas fundamentais na optimização de redes de monitorização.

3.3 Geofísica

- **A Geofísica na Detecção e Parametrização de Aquíferos. Algumas Aplicações**: por R. Andrade Afonso; R. M. D. Gonçalves e L. A. Mendes Victor

Os autores apresentam uma clara definição das potencialidades da geofísica:

A prospecção geofísica desempenha um papel importante na detecção, quantificação, e também na determinação de parâmetros hidrogeofísicos que permitem, a partir dos valores obtidos por métodos geofísicos, uma aproximação aos valores de parâmetros hidrológicos como a condutividade hidráulica, a porosidade, a transmissividade, etc. Permitem ainda, a delimitação de áreas de maior ou menor vulnerabilidade à poluição, pela detecção de zonas de fractura e/ou pela localização e quantificação da espessura das camadas de argila e bem assim pelas zonas de descontinuidade eventualmente existentes naquelas.

Área de aplicação*: No presente trabalho apresentam-se alguns resultados obtidos pelos autores no Algarve em ambiente cársico e no aquífero poroso costeiro de Monte Gordo. Os modelos obtidos, confirmados por furos existentes ou posteriormente efectuados, levam-nos a afirmar que as metodologias utilizadas são eficazes para o estabelecimento da geometria da circulação das águas subterrâneas nos meios mencionados. ...(Outro) meio apresentado corresponde às bacias do baixo Tejo e Sado. O número de sondagens é de cerca de uma centena, tendo uma parte destas sido cedida pelo Instituto da Água (INAG). As sondagens eléctricas verticais efectuadas permitiram o estabelecimento da geometria destas formações na margem esquerda do baixo Tejo, com especial incidência na península de Setúbal. O modelo obtido está de acordo com as sondagens mecânicas existentes, tendo-se, no entanto, atingido em muitos casos, profundidades de investigação muito superiores à profundidade da generalidade dos furos existentes. O cálculo da resistividade das formações pode pois ser um*

auxiliar precioso na determinação da vulnerabilidade, bem como no cálculo de uma primeira aproximação à poluição química das águas subterrâneas.

Os autores concluem que:

Os resultados apresentados mostram que os métodos geofísicos são um auxiliar precioso em hidrologia. A detecção e avaliação de recursos em meios geológicos complexos, como sejam os ambientes cársicos, podem ser efectuados com êxito desde que haja um conhecimento adequado da geologia e consequentemente do modelo físico associado.

O estudo de problemas de intrusão salina, bem como uma primeira aproximação à concentração de poluentes químicos nas águas subterrâneas pode efectuar-se de forma expedita usando, por exemplo, o método da resistividade.

A parametrização dos aquíferos e nomeadamente a determinação da geometria, porosidade, condutividade hidráulica e transmissividade podem calcular-se de forma detalhada nos aquíferos porosos, nos aquíferos em que a sua matriz é constuída por camadas alternadas de argila e areia e ainda naqueles cuja matriz porosa contém argila em maior ou menor percentagem.

- **Importância do Uso de Métodos Geofísicos Electromagnéticos Very Low Frequency Electromagnetics (VLF-EM) e Radio Magnetotelluric – Resistivity (RMT-R) no Estudo de Aquíferos Cársicos do Alentejo e do Algarve:** por Amélia de Carvalho Dill; Imre Müller; Augusto Marques da Costa e José Paulo Monteiro

Os autores utilizam métodos geofísicos, tirando partido da utilização de ondas de rádio (presentes em todo o mundo). Salientam que os aquíferos cársicos se caracterizam pela existência de uma rede de condutas cársicas interconectadas de conductividade hidráulica elevada, rodeada por blocos de calcários fracturados, de baixa permeabilidade. Para além do carácter heterogéneo inerente ao comportamento hidráulico dessas formações, o hidrogeólogo que pretenda simular matematicamente esses aquíferos, defronta-se sempre com a inexistência ou falta de dados que lhe permitam estabelecer um modelo conceptual geométrico, que seja minimamente próximo da realidade.

Da comunicação salientam-se as seguintes conclusões:

Procurou-se exemplificar a informação obtenível com os métodos electromagnéticos VLF-EM e RMT-R e demonstrar as suas vantagens :

- *a fonte de energia que utilizam é permanente e acessível em qualquer ponto do mundo;*
- *realçam as heterogeneidades existentes (presença de falhas, condutas cársicas, contactos litológicos, etc);*
- *são rápidos e de fácil utilização;*
- *permitem observações em rede muito apertada (RMT-R) ou registos contínuos*

(VLF-EM), o que facilita a interpolação de valores nos meios heterogéneos;
- *fornecem indicações sobre a natureza, estrutura e geometria dos aquíferos.*
- *As limitações que apresentam são:*
- *profundidade de penetração pequena quando o subsolo é muito condutor (VLF-EM e RMT-R);*
- *sensibilidade a ruídos industriais, fios eléctricos e telefónicos.*

- **Delimitação de Variações Laterais num Reservatório Aluvionar com Métodos Eléctricos**: por Nuno Alte da Veiga

O autor utiliza um método eléctrico para delimitar variações laterais na composição de um depósito na zona de sopé a NW da Serra da Estrela. Da sua comunicação salientam-se as seguintes conclusões:

Os recursos hídricos associados às regiões de soco cristalino são por regra escassos. Nestes ambientes são por vezes uma excepção pequenas manchas de depósitos aluvionares que constituem aquíferos com capacidade para abastecimento de populações e para usos agrícolas. A qualidade destes depósitos como reservatório, para além da sua possança e da superfície que ocupam, está dependente da natureza dos materiais que os constituem (em particular da sua granulometria) e da sua distribuição espacial. No geral, em depósitos aluvionares há uma correlação entre a granulometria dos materiais presentes e a resistividade eléctrica dos mesmos. Este facto possibilita a utilização de métodos geofísicos na delimitação de variações verticais e/ou laterais nas aluviões.

Para além da variação da resistividade com o tipo e possança dos sedimentos, ficou ilustrado no caso presente que para profundidades de investigação relativamente reduzidas a profundidade do nível piezométrico tem uma influência importante nos valores de resistividade aparente medidos. Assim sendo, e no caso geral, as variações de resistividade aparente de escala regional devem ser encaradas com alguma reserva, sendo especialmente significativas as variações de escala local.

3.4 Geotermia

- **Recursos Geotérmicos de Baixa Entalpia em Portugal Continental:** por Maria Carla Lourenço

A autora apresenta uma interessante comunicação sobre geotermia, do ponto de vista de um projecto em curso no IGM. Salienta que *no nosso país ocorrem águas com temperaturas relativamente elevadas, que variam entre os 20ºC e os 76ºC, pelo que se torna importante a melhoria do conhecimento deste tipo de águas.* Da sua comunicação salienta-se o seguinte:

Em Portugal Continental só é economicamente viável a geotermia de baixa entalpia, sendo o calor utilizado para a balneoterapia, aquecimento ambiental e de estufas, etc. No entanto, o tipo de utilização mais comum, com fins de aproveitamento de calor, é ainda a balneoterapia, apesar de existirem ocorrências termais cuja exploração poderia ser bastante superior e que não o é, talvez por desconhecimento dos concessionários relativamente ao aproveitamento da

energia e à pouca divulgação relativa aos possíveis tipos de aproveitamento da mesma.

... sobressaem em Portugal algumas áreas cujo potencial geotérmico se encontra directamente relacionado com aspectos essencialmente tectónicos, que favorecem a circulação ascendente rápida dos fluidos, constituindo anomalias geotérmicas locais que se afastam dos valores regionais de gradiente geotérmico em Portugal. Esta circulação ascendente, conjugada com as formações geológicas atravessadas pelo fluido, constituem factores fundamentais para a caracterização do mesmo. É o caso dos diapiros salíferos que influem significativamente na geoquímica das águas, conferindo um aumento na sua mineralização total que, por vezes, chega a atingir os 3400 mg/l, devido ao enriquecimento em cloretos, sulfatos, sódio e cálcio.

A captação das ocorrências que foram utilizadas para tratamentos médicos fazia-se, na sua maior parte e até há poucos anos atrás, a partir de nascentes superficiais. Por esse motivo, revelavam-se com uma produtividade relativamente baixa, principalmente as localizadas no Maciço Hespérico. Além da frequente escassez de caudais, a captação por nascente revelava-se igualmente com uma elevada vulnerabilidade à poluição, pelo que se tornava desejável a substituição progressiva desta por captações profundas.

- **A Utilização em Multi-Usos da Água Minero-termal do Campo Geotérmico de S. Pedro do Sul**: por Luís M. Ferreira Gomes e Fernando Albuquerque

Os autores analisam a água minero-termal do "Campo Geotérmico de S. Pedro do Sul", apresentando uma extensa bibliografia sobre o tema. Da sua comunicação salientam-se as seguintes conclusões:

... neste trabalho apresentam-se alguns aspectos associados à hidrologia da região, qualidade e quantidade do recurso, salientando os multi-usos que actualmente esta água já está a ter (uso medicinal e aquecimento de estufas com produção de frutos tropicais), outros que estão em projecto (aquecimento ambiental de infra-estruturas urbanas, aquecimento de água para uso sanitário), e outros que poderão vir a ser implantados, como por exemplo associados ao lazer, turismo, floricultura com produção de outros frutos para além do ananás e banana (já em produção) e aquicultura.

- **Caracterização de Maciços Fracturados com Traçadores:** por Nelson Edgar Viegas Rodrigues

O autor analisa o escoamento de fluidos e o transporte de solutos em meios fracturados de *"Rocha Quente e Seca"*. Da sua comunicação salientam-se as seguintes conclusões:

A interpretação de cada curva de um teste por traçadores indica que a dispersão mecânica é dominante em relação à difusão molecular e que o transporte de solutos é fundamentalmente por convecção.

Os resultados dos testes de simulação mostram um decaimento exponencial imediatamente

após o pico de concentração. Os resultados observados indicam que a cauda de uma curva com traçador não pode ser explicada por um único decaimento exponencial.

Os resultados não são compatíveis com modelos de placas paralelas ou combinação destes. A análise que melhor se coaduna com os resultados obtidos indica a combinação de uma circulação canalizada de volume reduzido, mas por onde é escoado a maior parte do fluido, com uma circulação difusa, conduzindo uma pequena parte do fluido mas que ocupa a maior parte do reservatório.

3.5 Captações/Legislação

- **Moralização na Execução de Furos de Pesquisa e Eventual Captação de Água Subterrânea e Métodos de Perfuração Utilizados na sua Realização**: por José Quitério Costa

O autor analisa as vantagens e as desvantagens dos métodos de perfuração, apresentando importantes regras para a execução e autorização técnicas de novas captações, do ponto de vista do INAG. Da sua comunicação salientam-se as seguintes conclusões:

O tema apresentado desenvolve-se em duas vertentes fundamentais:

A primeira relativa à proposta de alterações ao DL 46/94 - sobre licenciamento de furos de pesquisa e eventual captação de águas subterrâneas - e moralização dos Empreiteiros no que concerne à execução dos referidos furos. Na segunda referem-se métodos de perfuração mais utilizados na execução de furos, vantagens e desvantagens de cada um deles, propondo-se a obrigatoriedade da execução de "logs" (diagrafias) antes da completação das captações, nomeadamente sempre que o método de perfuração não seja o de "circulação inversa".

No que concerne a 1ª fase do tema proposto - normas - até ao momento, qualquer Entidade solicita junto da Direcção Regional do Ambiente um pedido de licenciamento para a execução de uma pesquisa, o qual posteriormente é transformado em licença de exploração e utilização. Propõe-se que futuramente esse pedido deva ser acompanhado de um projecto de captação devidamente fundamentado relativamente aos fins a que se destina, referindo nomeadamente:

- método de perfuração a utilizar

- diâmetros

- tipo de revestimento

- débito pretendido, etc.

- **Caracterização e Gestão dos Recursos Hídricos Subterrâneos em Portugal Continental**: por J.Martins Ferreira

O autor *destaca a necessidade da constituição duma base de dados fiável, a implementação do recenceamento imediato de todos os agentes intervenientes nos processos de pesquisa e*

captação de águas subterrâneas, o reforço da importância do CNA e dos CBs na definição da política da água e a promoção de campanhas de formação e informação destinadas a sensibilizar todos os utentes da água para a sua imprescindível gestão.

A comunicação *é apresentada em nome da ATISO - Associação Nacional dos Técnicos e Industriais de Sondagem e nela pretende-se comentar e justificar um esquema que permita a necessária colheita de dados sobre os recursos hídricos subterrâneos e seu consequente tratamento de modo a ser possível à Administração a implementação de um quadro jurídico baseado em informações credíveis e atempadas que possa apoiar a organização do sector.*

- **Contribuição para o Enquadramento Jurídico da Pesquisa e Captação de Água em Portugal**: por J. Martins Ferreira

O autor apresenta uma contribuição em nome da ATISO - Associação Nacional dos Técnicos e Industriais de Sondagem para o enquadramento jurídico da pesquisa e captação de água. Da sua comunicação salientam-se os princípios-base *de um quadro legislativo que pretenda controlar a captação e exploração das águas subterrâneas:*

- *A protecção dos Recursos Hídricos Subterrâneos e, se possível, a sua melhoria de qualidade, admitindo a sua exploração de acordo com regras de gestão a estabelecer pela Tutela.*
- *Obrigatoriedade de licenciamento para todas as captações condicionando esse acto de acordo com o posicionamento hidrogeológico previsível da captação a licenciar.*
- *Rapidez simplicidade e clareza na resposta a este licenciamento de modo a não desmotivar o futuro utilizador levando-o à fuga à lei.*
- *Penalização de todos os agentes intervenientes nos actos de captação e exploração de águas subterrâneas não licenciadas ou que não obedeçam aos condicionamentos referidos* (anteriormente).

3.6 Impacto Ambiental de Actividades Antrópicas

- **Impacte da Cultura de Eucaliptos sobre os Recursos Hídricos Subterrâneos da Serra de Ossa**: por Herlander Lima; António Chambel; João Alves e Pedro Francisco

Os autores apresentam uma importante e original comunicação sobre o impacte da cultura de eucaliptos nos recursos hídricos subterrâneos alentejanos. Da comunicação salienta-se o seguinte:

A plantação de eucaliptos em socalcos, utilizada na zona (da Serra de Ossa), *favorece a infiltração, reduzindo o escoamento superficial. No entanto, a sua grande densidade pode reduzir em 15% a quantidade de água, proveniente da precipitação, que cai sobre o solo. Outro factor negativo é a destruição das estruturas básicas das captações tradicionais*

durante a fase de plantação.

Tendo em conta os factos, os eucaliptos têm grande influência sobre os recursos hídricos subterrâneos por serem plantados em regime muito denso. Num clima do tipo registado na Serra de Ossa, e numa floresta densa, a evapotranspiração é muito mais elevada do que a infiltração o que contribui grandemente para o empobrecimento do solo em água e para uma redução significativa da mesma na zona de água subterrânea que circula sobre a rocha mais compacta. É esta influência que é claramente corresponsável pelo desaparecimento dos caudais das nascentes. Os dados obtidos directamente da população reforçam a ideia de que uma floresta densa tem fortes implicações sobre os recursos hídricos, isto é, causa a diminuição ou perda total das reservas hídricas subterrâneas que dão origem às captações mais superficiais, sobretudo numa zona quente e seca como é o caso da Serra de Ossa.

- **Aterros Sanitários e Recursos Hídricos. Um Caso Prático**: por Alberto Pais Quina e José Rocha Neves

Os autores apresentam uma reflexão sobre os graves problemas ambientais que os aterros sanitários podem provocar não só no local onde se situam como na zona envolvente, em consequência de gases e lixiviados que deles resultam. Da sua comunicação salienta-se o seguinte:

... para a selecção do local destinado ao aterro, deve-se considerar a análise de vários factores, tais como a topografia, a área a ocupar, distâncias (a aglomerados populacionais) e acessos, existência de material de cobertura, aquisição do terreno, direcção predominante do vento, ecologia e paisagem e como já se referiu a eventual contaminação das águas de superfície e subterrâneas. Sob o ponto de vista hidrogeológico, não se podendo construir o aterro no local ideal como acontece por vezes, há que recorrer-se às tecnologias actuais que permitem superar as dificuldades mediante a colocação de barreiras de argila e/ou geotêxteis e membrana sintética, que possibilitam as condições de impermeabilidade requeridas. A implementação de rede de controlo das águas (piezómetros) é imprescindível.

3.7 Zona Não-Saturada

- **Propagação de Nitratos na Zona Vadosa do Solo. Apresentação de um Ensaio de Traçador Realizado no *"Aquífero Artificial"* do GIAS**: por Teresa Eira Leitão; Seán P. Quigley e J.P. Cárcomo Lobo Ferreira

Os autores apresentam os resultados de um ensaio de traçador efectuado com nitratos no "aquífero artificial" do Grupo de Investigação de Águas Subterrâneas do DH/LNEC. Com os resultados obtidos nos ensaios, quantificam-se os principais processos responsáveis pela migração dos nitratos em profundidade, em condições de não-saturação. Da sua comunicação salienta-se o seguinte:

O projecto tem como objectivo último o desenvolvimento de um modelo de elementos finitos bi-dimensional, e (sua calibração) *com base em ensaios experimentais realizados a duas escalas: (1) em laboratório (coluna de ensaio com 0,112 m x 0,5 m) e (2) num modelo físico, i.e. num "aquífero artificial" (2 m x 4 m x 1,5 m). Para a injecção do nitrato (durante 63 minutos) foram utilizados 55 l de traçador com a concentração de 77,49 mg/l de NO_3^-. As amostras foram recolhidas de acordo com o programa de amostragem e enviadas para o laboratórios para análise do nitrato, nitrito e azoto amoniacal.*

Face à incerteza inicial sobre o valor dos parâmetros de escoamento e de transporte e, também, à eventual ocorrência de fenómenos de "fingering", i.e. de percolação vertical preferencial em diversas zonas, consideram-se os resultados obtidos bastante satisfatórios.

3.8 Aquíferos Cársicos

- **Modelação Matemática de Escoamento em Aquíferos Cársicos. Discussão de Objectivos e Métodos Baseados num Caso de Estudo:** por J. Paulo Monteiro e M. Lourenço Silva

Os autores apresentam a aplicação de modelos matemáticos de escoamento para simulação de fluxo no aquífero carbonatado da Serra de S. Mamede. Da sua comunicação salienta-se o seguinte:

Para um "ano hidrológico médio", definido com base nos valores de precipitação e temperatura, calculados a partir do tratamento estatístico de séries climáticas correspondentes aos anos hidrológicos compreendidos entre 1960 e 1990, a recarga anual nos 7.8 km^2 da formação carbonatada é da ordem dos $3.5x10^6 m^3$ (*i.e.* recarga = 449 mm).

Se considerarmos o aquífero constituído por elementos com uma dada transmissividade que permita o acerto dos balanços, como efectuado para o modelo em diferenças finitas, os valores de potencial hidráulico apresentam-se sempre sobrestimados nas áreas mais afastadas dos pontos onde são impostos. A causa fundamental deste erro corresponde à incapacidade de simulação da rede de condutas cársicas, cujas transmissividades são superiores às que podem ser calculadas a partir de ensaios de bombagem. Sendo assim a parte de água que se infiltra directamente nas condutas cársicas, atingindo rapidamente as saídas naturais (por vezes em questão de horas) não pode simular-se. Daí os valores sobrestimados de potencial hidráulico.

O conhecimento, sempre (muito) parcial, da rede de condutas cársicas pode ser simulado pelo método dos elementos finitos, considerando uma geometria hipotética para a sua distribuição espacial no aquífero, definida, de forma mais ou menos detalhada, em função dos meios disponíveis para a sua caracterização.

Mostrou-se que, para alguns fins, é verossímil a aplicação de modelos em diferenças finitas que têm a vantagem de ser de aplicação bastante mais simples. Por outro lado, mostrou-se que com este tipo de modelos, existem limitações que impedem a simulação correcta dos aquíferos cársicos.

3.9 Recarga Artificial

- **Teledetecção na Recarga dos Aquíferos Subterrâneos com Águas de Superfície**: por Mário Vicente Silva

O autor apresenta exemplos práticos de interpretação fotogeológica. Relata uma interessante conversa tida com trabalhadores que estavam a abrir um poço implantado em xistos, perto de uma importante falha na ribeira do Monte dos Clérigos:

"Estava a trabalhar no fundo do poço quando começou a chover. Não demos por nada. De repente começámos a ouvir um barulho ensurdecedor e mal tivemos tempo para fugir do poço que de um momento para o outro ficou alagado". O autor comenta: *É curioso notar que este poço apesar de implantado nos xistos, tem um comportamento muito parecido com o de um meio cársico (análise química da água indicia este fenómeno apesar de não existirem calcários no local). No campo vimos que na área fracturada predominavam os grauvaques sobre os xistos. Nestas circunstâncias os grauvaques comportar-se-iam praticamente como rochas porosas circulando a água por um conjunto de poros (pequena circulação) e ao mesmo tempo ao longo da falha (grande circulação).*

Esta observação surpreenderá pela **muito rápida resposta da infiltração** e consequente percolação subterrânea provocada directamente por um episódio de precipitação em xistos do **Maciço Hespérico**.

3.10 Vulnerabilidade à Poluição

- **Vulnerabilidade à Poluição de Águas Subterrâneas: Fundamentos e Conceitos para uma melhor Gestão e Protecção dos Aquíferos de Portugal**: por J. P. Cárcomo Lobo Ferreira

O autor descreve nesta comunicação conceitos relacionados com a vulnerabilidade à poluição de águas subterrâneas. Apresenta diversos métodos, "clássicos" e indexados, disponíveis na Europa e nos EUA para avaliação da vulnerabilidade à poluição. Inclui dois mapas, um relativo aos EUA e outro à região austral de África. Para Portugal Continental, apresenta dois mapas à mesma escala (i.e. sobreponíveis na comunicação) um com a vulnerabilidade "clássica" e outro resultante da aplicação do método DRASTIC. A melhor resolução do mapeamento DRASTIC pode ser observada, num extracto de um mapa elaborado para a zona costeira portuguesa continental à escala 1:100 000. Visando permitir ao leitor o aprofundamento e a clarificação do tema, a comunicação inclui diversas ligações directas a páginas da Internet sobre vulnerabilidade de aquíferos à poluição. Da comunicação salienta-se

o seguinte:

Foi decido (pelo Grupo de Trabalho sobre Águas Subterrâneas do Instituto Europeu da Água reunido em Fevereiro de 1991, em Bruxelas, para a Comissão das Comunidades Europeias) que seria necessário uniformizar os critérios e os procedimentos a usar em cada Estado-membro, para avaliar, classificar, e mapear a vulnerabilidade à poluição das águas subterrâneas. As vantagens dessa uniformização seriam as seguintes:

1. *os mapas produzidos num país seriam facilmente interpretados por todos;*
2. *os mapas de diferentes países seriam comparáveis entre si e permitiriam o mapeamento trans-fronteiriço e multi-regional;*
3. *diálogo entre profissionais do sector, de diferentes países, seria facilitado, e seria benéfico uma vez que a experiência adquirida num deles poderia com mais facilidade ser utilizada pelos restantes países; e*
4. *seria então possível criar uma base de dados compatível, e coerente, que incluiria dados de todos os Estados-membros, se, e sempre que, possível baseada na experiência adquirida no âmbito do Projecto Comunitário CORINE.*

Na comunicação apresenta-se a sugestão, aceite na reunião de Bruxelas em 1991, para um novo mapeamento comunitário das águas subterrâneas. Finaliza-se a comunicação, com a apresentação de alguns mapeamentos da vulnerabilidade à poluição realizados para Portugal Continental pelo método DRASTIC.

3.11 Monitorização

- **Monitorização da Qualidade da Água Subterrânea em Situações Especiais**: por Ana Rita Lopes; Maria Emília Macedo; Marco Orlando e Carlos Cupeto

Os autores apresentam uma comunicação sobre a necessidade da monitorização da qualidade da água subterrânea visando a conservação e preservação dos recursos hídricos subterrâneos.

Da sua comunicação salienta-se o seguinte:

Na comunicação apresentam-se dois casos de estudo de redes específicas de águas subterrâneas em exploração. Pretende-se com estas redes, por um lado, controlar a eventual poluição difusa resultante da agricultura (perímetro de rega do Marvão) e por outro, controlar a eventual poluição pontual proveniente de um aterro sanitário (aterro sanitário de Alcanena).

Os recursos hídricos subterrâneos em Portugal continental têm constituído, ao longo dos últimos anos, a principal origem de água para os diversos fins - doméstico, industrial e agrícola.

Desta forma importa acompanhar a tendência evolutiva deste recurso, não só do ponto de vista quantitativo como qualitativo, uma vez que não é possível descurar o binómio quantidade/qualidade.

... a rede de monitorização (de Alcanena) em curso compreende 7 pontos de observação, dos

quais, 5 pontos de observação captam o aquífero livre e 2 furos captam o aquífero profundo.

A rede de monitorização do Marvão compreende 15 pontos de observação dos quais 11 distribuem-se pela formação carbonatada, e 2 furos inserem-se nas formações cristalinas, dado que o perímetro de rega intersecta igualmente estas rochas.

Tem-se assim acompanhado a tendência evolutiva dos recursos hídricos subterrâneos nas duas regiões consideradas - Alcanena e Marvão.

Relativamente ao aquífero aluvionar livre de Alcanena, o facto de se verificar na água analisada tão pequena concentração de substâncias perigosas faz crer que a matriz sólida do aquífero apresenta um considerável poder de retenção destas substâncias.

No que concerne ao aquífero profundo do Miocénico inferior constata-se que os parâmetros analisados inserem-se nos requisitos das normas de água para consumo humano.

No que respeita ao perímetro de rega do Marvão, considera-se que os recursos hídricos subterrâneos inseridos na área do regadio apresentam boa qualidade, não havendo indícios de poluição difusa resultante da agricultura, no entanto será importante ampliar o número de pontos a monitorizar no aquífero xistento coberto pela área a regar, uma vez que a nascente da Madalena apenas reforça as observações sobre o sistema carbonatado de Escusa.

PARTE II : ESTUDOS DE ÂMBITO ESSENCIALMENTE "REGIONAL"

4. ESTUDOS DE ÂMBITO ESSENCIALMENTE "REGIONAL"

4.1 Introdução

Apresenta-se nesta secção o relato relativo os sub-temas de âmbito essencialmente "Regional": Estudo dos Recursos Hídricos Subterrâneos do Alentejo - ERHSA; Açores; Aveiro; Ribatejo, Oeste e Vale do Tejo; Algarve; Madeira e Porto Santo; Minho; Beiras; Trás-os-Montes.

4.2 Estudo dos Recursos Hídricos Subterrâneos do Alentejo (ERHSA)

O Projecto "Estudo dos Recursos Hídricos Subterrâneos do Alentejo (ERHSA)", coordenado pela Comissão de Coordenação da Região do Alentejo (CCRA) integra, na sua elaboração, quatro entidades: o Instituto da Água (IA), o Instituto Geológico e Mineiro (IGM), a Direcção Regional do Ambiente do Alentejo (DRA - Alentejo) e a Universidade de Évora (UE). A Universidade de Évora e a Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (FCUL), através do seu Departamento de Geologia, desenvolvem trabalho conjunto, no âmbito de protocolo próprio. Este Projecto envolve o estudo hidrogeológico de todo o Alentejo e desenvolve-se entre o último trimestre de 1996 e o final de 1999.

O protocolo estabelece a finalidade do estudo, que por parte da UE/FCUL, poderá ser sintetizado nalguns pontos essenciais:

- identificar os recursos hídricos subterrâneos do Alentejo de uma forma alargada e abrangente, do ponto de vista qualitativo e quantitativo;
- testar técnicas de prospecção, pesquisa e captação de águas subterrâneas, utilizando soluções inovadoras para aumento da produtividade das mesmas;
- colaborar na resolução de problemas pontuais relativos aos recursos hídricos subterrâneos ou às redes de abastecimento de água;
- integrar os conhecimentos relativos ao meio hídrico na sua globalidade, promovendo a gestão integrada águas subterrâneas/águas superficiais;
- calcular os custos associados ao recurso e promover soluções mais económicas,

sempre que tal for possível;

- sensibilizar e propiciar formação e informação às entidades locais que trabalham no domínio da água no Alentejo;
- divulgar os resultados de forma útil, e colocá-los à disposição de todas as entidades que intervêm nos processos de ordenamento do território e de gestão dos recursos hídricos.

O objectivo geral é dotar as entidades com competência administrativa na gestão dos recursos hídricos subterrâneos, de conhecimentos técnico-científicos que permitam a sua utilização racional, evitando comprometer a qualidade fisico-química da água e o tempo de vida dos aquíferos.

• **Sistemas Aquíferos de Estremoz-Cano e de Elvas-Vila Boim - Estudo dos Recursos Hídricos Subterrâneos**: por Sandra Carvalho; Carla Midões; Pedro Duarte; Marco Orlando; Alberto Pais Quina; Raúl Simões Duarte; Carlos Cupeto; Carlos Almeida e Manuel Oliveira da Silva

Os autores apresentam uma interessante introdução ao ERHSA. Desenvolvem uma comparação entre valores de caracterização química referente aos anos de 1989, 1991 e 1997. Da sua comunicação salienta-se o seguinte:

No âmbito do Estudo dos Recursos Hídricos Subterrâneos do Alentejo (ERHSA), cabe ao Instituto da Água, para além das competências que lhe estão consignadas na lei, o estudo do sistema aquífero de Estremoz-Cano (para o qual recebe a colaboração do Instituto Geológico e Mineiro) bem como do sistema aquífero de Elvas-Vila Boim.

No que diz respeito ao sistema aquífero de Estremoz-Cano pode-se, à partida, distinguir 2 sectores diferentes do ponto de vista geológico. Um, constituído por calcários de origem lacustre (Cano) e outro, associado às formações dolomíticas e carbonatadas do anticlinal de Estremoz. A cada um dos sectores encontra-se afecto um sistema aquífero: o poroso livre de Cano e o fissurado carbonatado de Estremoz.... A grande heterogeneidade associada ao aquífero de Estremoz evidencia-se no(s) ...valores de transmissividade a oscilar entre 72 m^2/dia (Monte do Espanhol) e 2739 m^2/dia (Vinha do Ferrador) (e nos) coeficientes de armazenamento que variam entre $8,4x10^{-4}$ e $5,0x10^{-2}$. (N)o aquífero de Cano ... os coeficientes de armazenamento encontrados são da ordem de $1,4x10^{-3}$ e $7,0x10^{-3}$ e transmissividades compreendidas entre 600 m^2/dia e 1170 m^2/dia.

Em termos qualitativos, a composição química da água no sistema aquífero de Estremoz-Cano mantém-se mais ou menos estável entre as campanhas de amostragem efectuadas (entre 1991 e 1997).

No que diz respeito ao sistema aquífero de Elvas-Vila Boim, pode-se dizer que não há valores qualitativos preocupantes, não se tendo verificado variações significativas a nível

hidroquímico (de 1989 a 1997), à excepção da concentração em nitratos que, ao contrário do que seria de esperar, decresceu, de modo geral, em todo o sistema aquífero, embora se possa admitir algum aumento pontual. Este facto poder-se-á dever a uma substituição progressiva de adubos orgânicos (azotados) por compostos químicos (sulfatados) na agricultura.

A água captada em ambos os sistemas aquíferos classifica-se como bicarbonatada cálcica a calco-magnesiana e, quando utilizada na rega, apresenta um perigo médio a alto de salinização do solo e um perigo baixo de alcalinização (chegando a ser reduzido no sistema aquífero de Estremoz-Cano), enquadrando-se, em qualquer dos casos, nas classes C2S1 e C3S1.

- **Sistema Aquífero de Monforte - Alter do Chão, uma das Áreas de Intervenção Detalhada do IGM no Projecto de Estudo dos Recursos Hídricos Subterrâneos do Alentejo**: por Álvaro H.Carvalho e Augusto M.Costa

Os autores analisam o sistema aquífero de Monforte - Alter do Chão. Da sua comunicação salienta-se o seguinte:

No âmbito do Projecto de Estudo dos Recursos Hídricos Subterrâneos do Alentejo (PERHSA), coordenado pela CCR Alentejo, foram atribuídas ao Instituto Geológico e Mineiro 5 áreas de intervenção detalhada, que correspondem a 4 dos principais sistemas aquíferos da região alentejana. Uma destas áreas é o sistema aquífero de Monforte - Alter do Chão.

Neste artigo estão expostos os trabalhos efectuados até agora, a caracterização hidrogeológica preliminar dos aquíferos e formações envolventes, as primeiras hipóteses de conceptualização dinâmica do sistema e a metodologia a aplicar para a sua futura caracterização.

O sistema aquífero de Monforte - Alter do Chão está localizado numa área onde a agricultura intensa associada aos baixos valores de precipitação e à quase inexistência de reservatórios de águas superficiais, se traduzem na sua importância estratégica para o desenvolvimento social e económico da região.

Considerando uma precipitação média anual da região de 600 mm, e admitindo uma taxa de infiltração eficaz de 40% (valor encontrado para rochas do mesmo tipo, em condições de topografia e coberto vegetal semelhantes), chegamos a um volume de recursos totais anuais médios da região de 1,6 hm^3.

Como foi referido, até à data os trabalhos levados a cabo incidiram, fundamentalmente, na recolha de informação e na implantação de redes de controlo. No entanto, de acordo com os resultados até agora obtidos, foi possível chegar às seguintes conclusões:

1. *A área de recarga dos aquíferos ligados às formações carbonatadas é superior à considerada até agora;*
2. *As rochas carbonatadas têm um comportamento hidráulico típico dos meios fracturados-cársicos;*
3. *As medições do nível piezométrico evidenciam a inexistência de barreiras hidráulicas entre o(s) aquífero(s) associado(s) às rochas carbonatadas e o(s) aquífero(s) associado(s)*

às rochas gabróicas. Daqui pode-se concluir que estamos perante um sistema aquífero, e que portanto, existe a necessidade de estudar os aquíferos em conjunto.

- **Sistema Aquífero Moura-Ficalho**: por Augusto Marques da Costa

O autor prossegue a sua análise do aquífero Moura-Ficalho, desenvolvendo estudos de caracterização piezométrica, rebaixamentos, etc.. Da sua comunicação salienta-se o seguinte:

Apresenta-se, de forma cartográfica, o desenvolvimento espacial destes aquíferos e descrevem-se as principais características de cada um, bem como os respectivos mecanismos de comunicação hidráulica.

Desde 1991 até 1997, foram desenvolvidos diversos trabalhos de prospecção geofísica e de prospecção por sondagens mecânicas, que serão apresentados com mais detalhe noutra comunicação "Monitorização dos Aquíferos da Região de Moura-Ficalho-Sondagens, Construção e Equipamento de Piezómetros". *Os resultados obtidos, sobretudo durante o corrente ano, vieram confirmar e detalhar o modelo conceptual existente para a região.*

Num conjunto de captações na Horta da Cristina, a leste de Moura, foi possível efectuar ensaios de aquífero. Assim, realizou-se um ensaio com bombagem a caudal constante, com medições de níveis num piezómetro. Embora se tenha observado um efeito de barreira negativa, resultante do contacto dos calcários dolomíticos com níveis de metavulcanitos e xistos, foi possível interpretar o ensaio de bombagem em regime transitório, bem como a respectiva recuperação. Os parâmetros físicos estimados são:

- $272 < T < 400\ m^2/dia$;
- $5.10^{-2} < S < 8.10^{-2}$.

- **Monitorização dos Aquíferos da Região de Moura-Ficalho Sondagens, Construção e Equipamento de Piezómetros**: por A. M. Costa; A. C. Dill; I. Müller e V. Oliveira

Os autores apresentam resultados da aplicação de técnicas geofísicas e de sondagens do IGM à região de Moura-Ficalho. Da sua comunicação salienta-se o seguinte:

Com o presente trabalho pretende-se apresentar as técnicas utilizadas na região de Moura-Ficalho, confirmando e detalhando diversos aspectos relacionados com o modelo hidrogeológico conceptual da região, tema este a desenvolver noutra comunicação ("Sistema Aquífero Moura-Ficalho").

São também apresentados alguns dos métodos que têm sido utilizados, especialmente nos domínios da prospecção geofísica e das sondagens, com o objectivo de ... estabelecer a rede de monitorização piezométrica e de qualidade, que incluíu diversos métodos de prospecção geofísica, sondagens de prospecção hidrogeológica, instalação e equipamento de piezómetros.

No tratamento dos mesmos, a orientação que está a ser seguida vai no sentido da utilização de modelos matemáticos (geoestatísticos, de simulação de fluxo e hidrogeoquímicos) e de

SIGs (Intergraph e ArcInfo) com base de dados ORACLE. O objectivo final será a implementação de modelos tridimensionais, o mais próximos possível da realidade hidrogeológica, que possam constituir ferramentas de apoio à gestão, em utilização conjunta com as redes de monitorização em instalação.

As principais conclusões são as seguintes:

1. *A base da Cobertura Terciária situa-se aos -44.9 m;*
2. *As nascentes de Três Bicas e Santa Comba correspondem a emergências, no Terciário, de água com uma origem profunda, ao nível do substrato hercínico - Aquífero Moura-Ficalho...;*
3. *Aquífero Moura-Ficalho, tem neste local uma espessura total da ordem dos 600 metros;*
4. *Este local corresponde à zona axial da estrutura anticlinal das Enfermarias;*
5. *O aquífero é constituído por uma sucessão de níveis, com permeabilidade por fissuração e carsificação, entre as profundidades -86 e -690 metros.*

- **Estudo dos Recursos Hídricos Subterrâneos do Alentejo (ERHSA) - Contribuição da Universidade de Évora**: por António Chambel e Jorge Duque

Os autores apresentam os objectivos e a contribuição da Univ. Évora para o ERHSA. Da sua comunicação salienta-se o seguinte:

A área definida exclusivamente para investigação por parte da UE corresponde basicamente às zonas de rochas de porosidade dupla do Maciço Hercínico Ibérico, com excepção das rochas carbonatadas. Engloba-se também o estudo de algumas formações sedimentares de cobertura de reduzida espessura que existem nalguns pontos do Alentejo.

A investigação que decorreu até agora compreende a inventariação de pontos de água e a sua caracterização hidroquímica e está a ser efectuada por uma equipa de 12 pessoas. Iniciou-se com o estudo dos recursos hídricos subterrâneos de 10 concelhos: Portalegre, Alter do Chão, Arraiolos, Vendas Novas, Montemor-o-Novo, Sines, Santiago do Cacém, Évora, Ferreira do Alentejo e Beja. O concelho de Mértola já havia sido objecto de estudo noutro projecto. No início de 1998 cobrir-se-ão aproximadamente dois terços da superfície do Alentejo, e, a meio do mesmo ano, pensa-se cobrir a totalidade da área.

A investigação desenvolvida permite desde já confirmar com mais alguns dados os resultados anteriormente obtidos relativos ao concelho de Mértola: as águas subterrâneas das formações da Zona Sul Portuguesa (ZSP), pelo menos as situadas a norte da Formação de Mira, têm mineralização muito acentuada, sendo possivelmente uma das situações que terão de ser esclarecidas na íntegra, a fim de verificar se existem, no Baixo Alentejo e no Alentejo Litoral, em toda a ZSP, áreas com qualidade e em quantidade suficiente para poder abastecer, pelo menos povoações de alguma importância. Porque hoje em dia esses abastecimentos fazem-se muitas vezes independentemente da qualidade, tomando como critério único a existência de caudais compatíveis com as utilizações.

- **Caracterização Hidroquímica das Águas Subterrâneas do Sector Oeste do Concelho**

de Alter do Chão: por Jorge Duque e António Chambel

Os autores desenvolvem uma análise hidrogeoquímica do sector Oeste do concelho de Alter do Chão. Da sua comunicação salienta-se o seguinte:

O estudo hidroquímico das águas subterrâneas do sector oeste do concelho de Alter do Chão está incluído no projecto Estudo dos Recursos Hídricos Subterrâneos do Alentejo (ERHSA).

Em termos de qualidade da água para rega, conclui-se que existe perigo de salinização alto a muito alto em cerca de 75% das amostras.

Em Setembro de 1997 foi realizado um inventário sistemático de pontos de água (furos, poços, charcas e nascentes) tendo sido reconhecidos 259 pontos de água.

Toda a região em estudo revela evidências das fracas produtividades dos aquíferos. A própria natureza das litologias aflorantes manifesta esse facto. A cobertura sedimentar, com componente argilosa elevada, é, por si, pouco permeável. Os eventuais aquíferos em rochas cristalinas, ou estão muito profundos, devido à espessura da cobertura, ou quando aflorantes, não mostram grandes evidências de alteração e fracturação capazes de sustentar captações de caudal elevado.

Quimicamente, as águas são muito mineralizadas e duras. Apresentam condutividades eléctricas elevadas, e concentrações de cloretos, em determinados locais, excessivos (> 200 mg/l). Os valores das concentrações de nitratos são na maior parte dos casos inferiores ao VMA (50 mg/l). Outra característica das águas desta zona é o excesso de ferro total, com concentrações superiores ao VMR (50µg/l). As concentrações de cálcio e magnésio também são relativamente elevadas. No caso do magnésio, o facto de existir nas componentes carbonatadas, um forte carácter magnesiano, como no cimento dos grés e conglomerados, dos litótipos da cobertura sedimentar, confirmada por análises realizadas onde se verificou a existência elevada de teores de $MgCO_3$, leva a que as interacções água/rocha confirmem a preponderância da fácies bicarbonatada calco-magnesiana.

- **Caracterização Hidroquímica das Águas Subterrâneas Correspondentes à Área da Carta Topográfica N.º 509 de Ferreira do Alentejo**: por Francisco Mira; António Chambel e Jorge Duque

Os autores analisam a componente hidrogeoquímica das águas subterrâneas da região de Ferreira do Alentejo. Da sua comunicação salienta-se o seguinte:

No total foram inventariados 159 pontos de água, entre furos, poços e charcas, dos quais a grande maioria eram poços.... Ao longo do trabalho de campo foram realizadas, in situ, medições de alguns parâmetros em 119 dos pontos inventariados, nomeadamente pH, temperatura e condutividade eléctrica .... Foi também possível recolher informação relativa à profundidade das captações e ao nível hidroestático.

A maioria dos parâmetros analisados têm valores que são superiores ao VMR (valor máximo recomendado) e ao VMA (valor máximo admissível) definidos pelo Decreto Lei n.º 74/90 de 7 de Março.

As águas das rochas sedimentares apresentam os valores mais elevados de mineralização com fácies predominantemente calco-sódicas. Nos gabros a mineralização é inferior e as águas são bicarbonatadas-cálcicas por vezes com tendência sódica ou magnesiana. As amostras recolhidas na área dos pórfiros, apresentam características cloretadas-sódicas. Em relação aos basaltos, as amostras têm características bicarbonatadas-sódicas por vezes com tendência cálcica ou cloretada.

As águas têm um pH que varia entre 7.3 e 8.3, com perfil básico.

A globalidade das amostras analisadas possuem um elevado grau de mineralização, com a condutividade eléctrica a apresentar um valor médio da ordem dos 2020 μS/cm. A média dos valores da dureza total ultrapassa 40º F.

São registados valores muito elevados de sulfatos, cloretos, cálcio, magnésio e sódio.

Relativamente ao índice SAR em função da condutividade eléctrica, que representa a qualidade da água para fins agrícolas, verifica-se que as amostras apresentam um perigo de alcalinização baixo (80%) a médio (20%) e um perigo de salinização alto (75%) a muito alto (25%).

Concluindo, as águas subterrâneas desta zona, na sua globalidade, apresentam qualidade físico-química algo deficiente, quer quando destinada ao abastecimento público, quer quando destinada à agricultura, embora, neste último caso, esta informação tenha de ser cruzada com a relativa à composição dos próprios solos, afim de aquilatar as verdadeiras consequências do seu uso.

- **Sistema Aquífero dos Gnaisses de Évora:** por Alice Fialho; António Chambel e Jorge Duque

Os autores descrevem do ponto de vista hidrogeológico e hidroquímico a região Évora-S. Manços. Da sua comunicação salienta-se o seguinte:

O trabalho pretende contribuir para o planeamento e gestão d(os) *recurso*(s) (hídricos subterrâneos), *cujas potencialidades nesta área eram totalmente desconhecidas até à relativamente pouco tempo. Actualmente, os vários regadios existentes na zona estão a aproveitar sem restrições os recursos deste sistema aquífero. Por exemplo, num total de 4 propriedades existem cerca de 70 captações com caudais médios da ordem dos 15 l/s, o que, por comparação com os caudais de 1 l/s característicos do Alentejo é considerado como muito bom. Está-se, no entanto, ainda muito longe de constatar uma sobreexploração global do sistema, uma vez que se trata de grande concentração de captações, mas muito localizadas.*

A partir de um estudo realizado no Monte da Lagoa .... obtiveram-se valores de transmissividade da ordem dos 150 m^2/dia, valor que está acima da média apresentada pela maior parte das litologias da região, que se situam entre 1 e 10 m^2/dia.

O sistema aquífero dos gnaisses da região de Évora apresenta, do ponto de vista quantitativo, potencialidades até à pouco tempo insuspeitas.

Neste momento, alguns empreendimentos agrícolas exploram caudais verdadeiramente importantes, quando comparados com outras zonas com litologias semelhantes.

Esse facto parece estar associado a uma grande bacia aplanada que permitiu uma espessura de alteração da rocha muito superior ao que normalmente existe nestas rochas do Alentejo. A fracturação, pelo menos nalguns pontos, parece ser também muito intensa. Esta constatação permite discutir a possibilidade de existência de bacias análogas noutras áreas, algumas das quais estão já a ser investigadas. Os caudais de exploração situam-se entre os 40 e os 80 m^3/h, sem sinal de quebras significativas durante todo o período de rega.

Recomenda-se desde já alguma atenção das entidades gestoras da água, para a necessidade de preservação deste recurso, com vista inclusivé ao complemento do abastecimento ao concelho de Évora, em caso de alguma ocorrência temporária nos sistemas actuais de abastecimento de água superficial que impeçam a sua utilização. Para tal, sugere-se a preservação das áreas próximas da canalização de água proveniente do Monte Novo, com execução de captações ao longo deste eixo, fundamentalmente nas áreas onde a água apresente menor mineralização.

- **Caracterização Hidroquímica das Águas Subterrâneas da Área das Corneanas Anfibólicas de Valverde, Évora**: por Vasques Condeça; António Chambel e Jorge Duque

Os autores desenvolvem uma análise hidrogeoquímica das rochas fracturadas do Maciço Hespérico na região de Évora. Da sua comunicação salienta-se o seguinte:

Na tentativa de delimitar o sistema aquífero das corneanas anfibólicas de Valverde, foi feito um inventário de campo, entre os meses de Junho e Setembro de 1997, no qual ...foram inventariados 95 pontos, dos quais 9 são furos, 10 nascentes, 75 poços e 1 corresponde a uma charca.

O sistema aquífero das corneanas de Valverde ocorre numa faixa estreita que separa, a leste os maciços quartzo a granodioritos da região de Évora e a oeste os gnaisses da região de Valverde - Boa Fé - S. Sebastião da Giesteira. Estas corneanas estão relacionadas com a instalação do domo intrusivo granodiorítico do maçico de Évora. Os valores de condutividade eléctrica demonstram uma mineralização ligeiramente mais acentuada da água das corneanas anfibólicas relativamente aos restantes litótipos e um pH com a mediana próxima do valor neutro.

Da totalidade das águas amostradas, 37% apresentam um parâmetro acima do valor máximo admissível (VMA) do decreto de lei 74/90 de 17 de Março e 25% registam dois parâmetros acima do VMA. É o ião cloreto que mais vezes excede o VMA (69% das águas amostradas).

Relativamente às águas recolhidas nas corneanas anfibólicas, os diagramas de Piper e Stiff permitem concluir que estas apresentam uma fácies bicarbonatada com tendência calco-sódica. As águas das rochas quartzodioríticas e granodioríticas têm fundamentalmente uma composição bicarbonatada-cloretada com tendência sódica, enquanto nas rochas gnáissicas apresentam uma composição bicarbonatada sódico-magnesiana. A amostra recolhida nos calcários tem uma fácies bicarbonatada calco-magnesiana.

Quanto à qualidade da água para rega, o diagrama de Riverside permitiu concluir que, na totalidade das amostras, não se verifica qualquer problema quanto à alcalinização, variando

o perigo de salinização entre o baixo e o alto. No entanto, a situação não é preocupante.

- **Caracterização Hidroquímica das Águas Subterrâneas das Rochas Cristalinas dos Concelhos de Montemor-o-Novo e Vendas Novas - Nota Prévia**: por Sílvia Guerreiro; António Chambel e Jorge Duque

Os autores apresentam uma caracterização hidrogeoquímica das águas subterrâneas dos concelhos de Montemor-o-Novo e Vendas Novas. Da sua comunicação salienta-se o seguinte:

A caracterização hidrogeoquímica das águas subterrâneas das rochas cristalinas dos concelhos de Montemor-o-Novo e Vendas Novas foi iniciada através de um reconhecimento de campo em que foram recolhidos dados in situ de condutividade eléctrica, temperatura e pH. Os pontos estudados são poços, furos e nascentes, tendo especial interesse aqueles que são utilizados para abastecimento público, e, no caso da existência de cobertura sedimentar, as captações mais profundas.

Os abastecimentos nesta região são realizados exclusivamente através de águas subterrâneas, sendo necessária uma gestão adequada deste recurso, a qual só é possível mediante uma boa caracterização dos aquíferos existentes.

Foi realizada uma análise estatística utilizando duas amostras distintas: uma de 52 furos e outra de 105 poços e nascentes.

Por comparação entre os diferentes tipos de captação pode-se concluir que as águas mais superficiais apresentam valores de condutividade pouco elevados quando comparados com as águas mais profundas. Isto é particularmente evidente a sudoeste do concelho onde se observam os valores máximos em furos e poços. Contudo, quando as medições são feitas em nascentes os valores decrescem abruptamente.

Por outro lado, as captações mais profundas têm condutividades mais elevadas devido a um maior tempo de residência da água, que induz maior mineralização. As captações superficiais apresentam valores inferiores, possivelmente devido a um tempo de residência reduzido, embora localmente alguns valores elevados demonstrem um tempo de contacto superior, uma alteração química mais significativa da fracção mais superficial das rochas ou a presença local de retalhos da cobertura sedimentar da bacia do Tejo.

- **Caracterização Hidroquímica das Águas Subterrâneas das Rochas Cristalinas do Concelho de Portalegre - Nota Prévia:** por Paulo Andrade; António Chambel e Jorge Duque

Os autores apresentam uma caracterização hidrogeoquímica das águas subterrâneas do concelho de Portalegre. Da sua comunicação salienta-se o seguinte:

O presente artigo pretende caracterizar sumariamente alguns aspectos da hidrogeologia das rochas cristalinas do concelho de Portalegre, nomeadamente no que respeita à componente hidroquímica.

Foram inventariados cerca de 60 pontos de água em todo o concelho de modo a obter uma

distribuição homogénea em termos espaciais. Em todos os pontos foram medidos parâmetros de campo, nomeadamente os valores de condutividade eléctrica (CE), pH e temperatura.

O concelho de Portalegre apresenta fundamentalmente, a nível geológico, rochas cristalinas. .... pode-se concluir que, de uma maneira geral, os aquíferos, a existirem neste tipo de litologias, podem ocorrer em 3 zonas distintas:

1. *Formações superficiais alteradas;*
2. *Zonas de profundidade intermédia, onde as zonas mais alteradas coexistem com fracturas;*
3. *Zona de rochas compactas e fracturadas, a maior profundidade.*

Geologicamente, o concelho de Portalegre apresenta duas áreas bastante distintas, separadas pelo cavalgamento de Portalegre, que põe em contacto a Zona Centro Ibérica (ZCI), a norte, com a Zona de Ossa Morena (ZOM), a sul.

Após a separação por tipos litológicos aflorantes em cada zona (rochas do precâmbrico, paleozóico e magmáticas) verificou-se que as águas subterrâneas das rochas da ZCI têm condutividades medianas relativamente baixas, na ordem dos 100 a 120μS/cm, com intervalo de variação entre 29 a 920μS/cm. As águas correspondentes às litologias da ZOM apresentam valores superiores quer em termos de mediana (278.5μS/cm), quer no intervalo de variação (de 62 a 121μS/cm). As águas subterrâneas das rochas do precâmbrico e do paleozóico da ZOM são mais mineralizadas que as restantes.

- **Contribuição para a Caracterização Hidrogeológica do Sistema Aquífero da Bacia do Sado**: por Paula Galego Fernandes e Manuel Oliveira da Silva

Os autores analisam o sistema aquífero da Bacia do Sado. Da sua comunicação salienta-se o seguinte:

O sistema aquífero da Bacia do Sado abrange uma área significativa desta bacia, cerca de 1352 km^2.

Em termos geológicos este sistema engloba o Quaternário (Areias de duna, Aluviões e Terraços), a Formação de Marateca, a Formação de Alcácer do Sal, a Formação do Esbarrondadoiro, a Formação de Vale do Guizo e o Paleogénico, funcionando este último e o maciço antigo conjuntamente como impermeável.

As águas apresentam uma fácies, fundamentalmente, bicarbonatada sódica ou cálcica, contaminação em metais diminuta, e em nitratos e sulfatos quase nula, dando origem a uma água aceitável para consumo humano. Os teores em metais presentes devem-se, fundamentalmente, à influência do meio geológico.

Em termos hidrogeoquímicos constatou-se que as águas são fundamentalmente bicarbonatadas sódicas ou cálcico-magnesianas, enquadrando-se, em termos da classificação para consumo humano, no campo das águas aceitáveis. Os teores em NO_3^- e SO_4^{2-} são bastante reduzidos (cerca de 6 e 15 mg/l, respectivamente) abaixo dos valores máximos recomendados.

No que diz respeito ao fluxo de água, foi possível identificar que na metade sul do sistema

aquífero, este se realiza de S para N.

- **Avaliação dos Recursos Hídricos Subterrâneos e Caracterização Hidráulica da Formação Carbonatada de Viana do Alentejo – Alvito:** por Irene Regina Ramos Candeias e Mário Lourenço da Silva

Os autores analisam o sistema aquífero do Sado. Da sua comunicação salienta-se o seguinte:

A formação carbonatada de Viana do Alentejo – Alvito tem uma área aproximada de 17,5 km^2, e é formada por calcários e dolomitos carsificados e rochas calcossilicatadas de idade câmbrica.

A precipitação média anual calculada pelo método de isoietas é de 651,9 mm.

A avaliação dos recursos hídricos subterrâneos e caracterização hidráulica da formação foi feita com base em: a) – aplicação do método de balanço de cloretos, resultando uma recarga média anual de 1,8x10^6 m^3 (nota do Relator: recarga (1,8/17,5 m) = 103 mm)*; b) – monitorização dos níveis de 13 pontos de água, o que permitiu detectar sentidos de fluxo e áreas de recarga; c) – ensaios de bombagem, a partir dos quais foram quantificados os parâmetros hidráulicos, transmissividade que varia entre 2500 e 3900 m^2/dia, coeficiente de armazenamento das fracturas entre valores da ordem de 10^{-2} a 10^{-1} e coeficiente de armazenamento dos blocos entre 10^{-4} a 10^{-3}.*

A formação carbonatada, que se estende com maior desenvolvimento entre as vilas de Alvito e Viana do Alentejo, abrangendo uma área aproximada de 17.5 Km^2, abastece de água a quase totalidade das populações daqueles concelhos, a qual é igualmente utilizada em regadio. Torna-se assim de grande importância a avaliação desses recursos bem como a caracterização hidráulica daquela formação.

- **Contribuição para o Conhecimento Hidrogeológico do Sistema Aquífero de Sines:** por Jorge Manuel Lavaredas e Manuel Oliveira da Silva

Os autores debruçam-se sobre o aquífero carbonatado da bacia de Sines. Da sua comunicação salienta-se o seguinte:

No âmbito do ERHSA, cabe à Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, em colaboração com a Universidade de Évora, o estudo deste sistema aquífero que abastece na totalidade os concelhos de Santiago do Cacém e Sines, e ainda o grande pólo industrial situado junto a Sines.

Através da observação dos dados de produtividades dos furos assim como dos dados das primeiras análises efectuadas, é possível realizar uma distinção clara entre as águas do aquífero terciário e do aquífero jurássico. As produtividades do aquífero terciário são mais fracas que as do aquífero jurássico, sendo as primeiras geralmente inferiores a 10 l/s e as segundas muitas vezes superiores a este valor, podendo atingir 100 l/s.

As águas do aquífero cenozóico são bicarbonatadas calco-sódicas, diferenciando-se das

águas do aquífero jurássico por apresentarem menor mineralização. As fácies bicarbonatadas calco-magnesianas e bicarbonatadas-cloretadas cálcicas dominam no aquífero jurássico, respectivamente no extremo E da área e Junto à Ribeira de Moinhos.

Não se verificando problemas de quantidade, verificam-se já problemas de qualidade, nomeadamente com nitratos, fundamentalmente devido à agricultura e também às explorações suinícolas, bastante frequentes nesta região.

O objectivo final deste trabalho será realizar a modelação do aquífero jurássico, sendo para isso necessário retirar algumas dúvidas relativamente à geometria deste aquífero, tornando-se imperioso realizar alguns furos de pesquisa e instalação de piezómetros, assim como obter dados históricos dos níveis piezométricos.

- **Caracterização Hidrogeológica da Bacia da Ribeira da Chaminé (Aquífero dos Gabros de Beja). Resultados Preliminares:** por Eduardo A. Paralta.

O autor analisa o aquífero dos Gabros de Beja, apresentando valores de teores de nitratos, uma correlação da superfície topográfica / superfície piezométrica e descrevendo a técnica VLF-EM. Da sua comunicação salienta-se o seguinte:

Dos 46 concelhos alentejanos, 29 são abastecidos ***exclusivamente*** *por águas subterrâneas, 16 por origens mistas e apenas 1 recorre unicamente a águas de origem superficial (Barrancos).*

No sentido de localizar zonas potencialmente produtivas, associadas à fracturação, foi ensaiado um método de prospecção geofísica designado VLF-EM (Very Low Frequency - Electromagnetic)...o VLF-EM é um método que se baseia na interpretação das interferências provocadas pelas estruturas naturais (fracturação, falhas, contactos litológicos, paleorelevos, etc.) no campo electromagnético primário, gerado por antenas fixas de longo alcance espalhadas um pouco por todo o mundo.

Na Figura 5 (da comunicação) *apresenta-se a relação entre a superfície piezométrica e a topografia na área da Bacia da Chaminé. Na Figura 10* (da comunicação) *apresenta-se a carta de isoteores de nitratos com base em medições efectuadas em 27 pontos de água no mês de Julho de 1997. Equidistância das isolinhas 5 mg/l. Escala aproximada 1: 65000.*

4.3 Açores

- **Estudo Preliminar da Microflora Bacteriana da Água Subterrânea do Arquipélago dos Açores:** por Lídia Flor, Adelaide Lobo, Marco Rosa e Aida Poupino

Os autores desenvolvem um interessante e original estudo de caracterização da microflora natural das águas subterrâneas dos Açores. Da sua comunicação salienta-se o seguinte:

O estudo da microflora natural das águas subterrâneas tem-se revelado da maior importância para a caracterização das mesmas águas e observação das modificações resultantes da actividade humana.

O estudo da microflora das águas subterrâneas do Arquipélago dos Açores iniciou-se com o isolamento de espécies bacterianas que proliferaram nos meios de cultura de m-Endo agar LES e m-FC agar, usados no controlo de qualidade da água para consumo humano.

Considerando que as origens de água subterrânea, no Arquipélago, se encontram a cotas inferiores às das zonas usadas permanentemente para pastoreio livre de gado bovino e que as formações geológicas são constituidas por basaltos muito fracturados e piroclastos muito desagregados, os aquíferos são extremamente vulneráveis à influência da poluição difusa.

As amostras foram efectuadas entre Janeiro de 1994 e Junho 1997, na água subterrânea das ilhas Terceira, S. Jorge, Flores, Corvo, Pico e Graciosa, num total de 900 amostras.

Nos aquíferos profundos e costeiros a diversidade das bactérias encontradas foi muito inferior ao observado nos aquíferos subsuperficiais. Neste tipo de aquíferos a presença de Escherichia coli é predominante. A variabilidade bacteriana encontrada é muitíssimo superior, apresentando-se a Pseudomonas aeruginosa, Serratia marcencens, Serratia liquefaciens e Aeromonas hydrophila, para além da Escherichia coli, como as bactérias com maior expressão. A contaminação de origem fecal nos aquíferos subsuperficiais é altamente significativa.

- **A Inter-Relação Entre Pluviosidade, Níveis Aquíferos e Suas Nascentes em Ilhas Vulcânicas: O Caso das Nascentes do Cabrito (Ilha Terceira - Açores)**: por Maria Emília Novo, J.P. Cárcomo Lobo Ferreira, F. Cota Rodrigues e E. Brito de Azevedo

Os autores desenvolvem um estudo de avaliação das reservas hídricas subterrâneas renováveis da caldeira que abastece a cidade de Angra do Heroísmo, sugerindo medidas para ultrapassar as situações estivais de carência de água. Da sua comunicação salienta-se o seguinte:

Neste trabalho estudou-se o aquífero de Algar I, desenvolvido em formações basálticas, com regime de circulação subterrânea próximo do cársico, e onde a variação dos níveis freáticos não raramente provoca a inundação das áreas deprimidas à sua superfície. Este aquífero escoa-se superficialmente através das nascentes do Cabrito e tem ligação hidráulica com aquíferos inferiores, por drenância através de um nível semi-permeável.

Para o aquífero foram calculados: o balanço hídrico, a recarga anual, os volumes anuais estimados de drenância e uma estimativa aproximada da evolução dos níveis freáticos nos meses cujos dados o permitiam.

A comparação entre os volumes de consumos e de caudais das nascentes do Cabrito permitiu quantificar a percentagem de recursos efectivamente explorada e apontar para soluções de resolução das carências hídricas.

Deste modo, verifica-se que R1 = 0,23 e R2 = 0,21, ou seja, a razão entre o caudal total anual e o caudal no mês mais chuvoso é similar à razão entre a capacidade de armazenamento do reservatório e a recarga anual. Sendo apenas 1/5 da recarga anual efectivamente armazenada pelo aquífero (Vv = 1/5 de RAQ), toda a restante parcela deve ser dissipada por drenância e/ou por escoamento das nascentes, em caudais anuais aproximados de, respectivamente, 5 hm^3/ano e 7,7 hm^3.

Atendendo à variação acentuada das reservas entre o Verão e o Inverno e considerando que os consumos variam entre 3 a 90 % dos caudais das nascentes (com um valor médio anual de

10%) conclui-se que em termos globais, os caudais de escoamento das nascentes do Cabrito permitem dar resposta às necessidades actuais dos consumos, com importantes excedentes no período de Inverno mas com situações de carência nos períodos mais secos.

- **Condições de Ocorrência e Funções Hidrogeológicas das Lagoas em Pequenas Ilhas Vulcânicas: Exemplo da Ilha das Flores, Açores**: por José M. M. Azevedo e Martim R. Portugal Ferreira

Os autores descrevem as condições hidrogeológicas, climáticas e topográficas necessárias para a formação de lagoas em pequenas ilhas vulcânicas e o seu papel no equilíbrio hídrico insular. Da sua comunicação salienta-se o seguinte:

A ocorrência de lagoas em ilhas vulcânicas de reduzida dimensão (área < 200 km^2) não é muito frequente, uma vez que resulta da convergência de diversos factores de natureza diversa. Destacam-se os seguintes: (1) factores climatológicos, nomeadamente, precipitação anual elevada e reduzida taxa de evapotranspiração; (2) factores vulcano-morfológicos, que conduzam à formação de depressões topográficas (crateras e caldeiras) inseridas em bacias hidrográficas endorreicas; (3) factores geológico-pedológicos, que induzam a construção de uma cobertura piroclástica de granulometria fina no fundo de crateras e caldeiras, cuja subsequente evolução supergénica conduza à colmatação-impermeabilização daqueles domínios; (4) estabilidade vulcano-tectónica e (5) factor tempo.

Terminado o processo de formação, a reserva hídrica superficial passa a integrar, depender e intervir no equilíbrio hídrico insular. Esta intervenção efectua-se principalmente aos seguintes níveis: (1) recarga contínua e aproximadamente uniforme do sistema aquífero, funcionando como agente regulador dos caudais das nascentes; (2) alimentador indirecto do escoamento superficial e amortecedor dos caudais das ribeiras, sobretudo no período invernal; (3) suporte das características climáticas das zonas envolventes através da estabilização das taxas de evaporação ao longo do ano.

O número considerável de lagoas e a sua localização em zonas de cota elevada da ilha das Flores, conferem a estas entidades um papel relevante no frágil e limitado equilíbrio hidrogeológico insular.

- **Estudo do Efeito de Maré em Aquíferos Costeiros. O Caso de Estudo da Ilha do Pico (Açores - Portugal):** por José V. Cruz e Manuel O. Silva

Os autores desenvolvem um interessante estudo do efeito de maré em aquíferos costeiros, calculando a "**difusividade hidráulica**" na ilha do Pico. Da sua comunicação salienta-se o seguinte:

No intuito de determinar a difusividade hidráulica efectuaram-se 17 ensaios de maré nos aquíferos costeiros basálticos do Pico, a segunda maior ilha do arquipélago dos Açores. Complementaram-se estes dados mediante a reinterpretação de ensaios de bombeamento e

observações de maré publicadas anteriormente.

Testaram-se dois modelos, um respeitante aos aquíferos confinados, aplicável também a aquíferos livres quando se observam algumas condições, e aos aquíferos semi-confinados. Os resultados obtidos são extremamente variáveis, demonstrando a heterogeneidade dos aquíferos vulcânicos. O primeiro modelo adoptado permitiu estimar uma difusividade hidráulica média de 6875,10 m^2/min, com um desvio padrão igual a 8012,95 m^2/min, enquanto os valores calculados pela formulação de aquíferos semi-confinados são mais baixos, e respectivamente iguais a 2284,69 m^2/min e 3767,46 m^2/min.

4.4 Aveiro

- **Influência da Troca Catiónica no Quimismo da Água no Aquífero Cretácico de Aveiro:** por Teresa I. F. Oliveira; Fernando T. Rocha e Manuel A. Marques da Silva

Os autores analisam a sobreexploração por variação das características hidrogeoquímicas da água do Aquífero Cretácico de Aveiro. Da sua comunicação salienta-se o seguinte:

Do estudo comparado dos valores de CTC obtidos, da soma dos catiões de troca, mineralogia da fracção argilosa e das análises químicas de águas, pode-se concluir que:

1. *na parte norte da área estudada, a CTC dos três níveis argilosos é menor do que a sul devido ao predomínio do mineral argiloso caulinite, sendo os valores obtidos para os três níveis bastante homogéneos;*
2. *na parte sul, existe discrepância entre os valores de CTC obtidos para os três níveis argilosos, apresentando estes tendência para a diminuição do seu valor em profundidade. A discrepância verificada entre a soma dos catiões de troca e o valor de CTC determinado poderá ser atribuída à dissolução de minerais carbonatados ou à transferência subterrânea de águas provenientes de formações carbonatadas, o que explicará a maior presença de cálcio;*
3. *na parte norte, ao não existir a Formação Carbonatada e não haver entrada de águas de outras proveniências, pode concluir-se que o abrandamento das águas poderá ser atribuído à reacção das águas continentais com a matriz argilosa. Estamos em presença de um processo de flushing, que consiste na expulsão de águas marinhas congénitas, com importante intercâmbio de bases: as águas doces continentais cedem à fracção argilosa iões cálcio e magnésio, tornam-se muito brandas e recebem, em troca, sódio.*

- **Caracterização Paleoclimática e Paleodinâmica do Sistema Multiaquífero Cretácico de Aveiro através da Aplicação de Isótopos Ambientais:** por Paula M. M. Carreira, António M. M. Soares; Manuel A. Marques da Silva; Luís Araguás-Araguás; Kazimier Rosanski e Martin Stute.

Os autores desenvolvem uma caracterização paleoclimática e paleodinâmica do sistema aquífero Cretácico de Aveiro. Da sua comunicação salienta-se o seguinte:

Face aos resultados obtidos é possível avançar com as seguintes conclusões:

i- até à data o sistema multiaquífero Cretácico de Aveiro está efectivamente isolado do sistema aquífero superficial, dada a ausência de trítio no sistema profundo e face às características químicas das águas. Por outro lado, não existem actualmente quaisquer indícios de intrusão marinha recente no sistema profundo originada pela intensa exploração do aquífero;

ii- embora se verifiquem actualmente no sistema profundo elevados níveis de exploração, todavia continua a verificar-se o padrão de fluxo subterrâneo em condições naturais, representado pelos teores em ^{14}C. Durante a última glaciação a descida em cerca 100 m do nível do mar terá sido responsável, por valores de gradiente hidráulico superiores aos actualmente observados. Daí o patamar de valores de ^{14}C observado entre aproximadamente os kms 8 e 16 da área de recarga, em que as idades corrigidas rondam os 18 ka BP;

iii- os resultados de $\delta^{18}O$ e de $\delta^{2}H$ determinados nas paleoáguas do sistema profundo indicam um enriquecimento nas espécies isotópicas pesadas segundo o sentido do fluxo subterrâneo, devido, provavelmente, ao enriquecimento isotópico da massa de água oceânica durante os tempos glaciares. O aquífero de Aveiro, ao ser um sistema costeiro, terá sido recarregado essencialmente pela precipitação originada no primeiro processo de condensação. A água subterrânea irá reflectir, em primeira instância, as modificações isotópicas ocorridas no oceano e não as variações de temperatura atmosférica induzidas por variações climáticas;

iv- as temperaturas médias obtidas através das análises de gases nobres dissolvidos nos sistemas subterrâneos indicam para as amostras com idades holocénicas (idades corrigidas de 14C inferiores a 10 ka BP e amostras do sistema superficial com 3H), temperaturas da ordem dos 14 ºC, valor similar ao valor médio anual de temperatura registado na região. As amostras com idades corrigidas de 14C em torno de 18 ka BP (idade Plistocénica - máximo glaciar) apresentam valores médios de temperatura de 9 ºC, indicando um clima muito mais frio na região durante esse período.

- **Evolução Hidrogeoquímica do Sistema Multiaquífero Cretácico do Baixo Vouga - Aveiro, Portugal:** por M. T. Condesso de Mello; Manuel A. Marques da Silva e W. M. Edmunds

Os autores desenvolvem uma análise da cinética química de reacção água-rocha do sistema multiaquífero cretácico do Baixo Vouga - Aveiro. Da sua comunicação salienta-se o seguinte:

Os resultados preliminares obtidos e numa primeira análise revelam um aquífero com uma cinética química de reacção água-rocha extremamente lenta, resultando da composição mineralógica essencialmente siliciosa por parte dos minerais que compõe o material aquífero.

A evolução da composição química das águas subterrâneas evidencia ainda a ocorrência de processos de intercâmbio catiónico, e que eventualmente reflectem ainda hoje o intercâmbio ocorrido nas fases iniciais de lixiviação do aquífero, por diluição da água salina existente nos minerais argilosos.

Na zonas do aquífero mais próximas do mar, onde os furos captam também águas da formação carbonatada pode ocorrer equilíbrio ou mesmo precipitação de calcite, dando origem a variações mais significativas da química da água.

Estes resultados obtidos permitiram, ainda dividir o aquífero do ponto de vista hidrogeoquímico em duas partes. Esta divisão coincide aproximadamente com o limite entre zona confinada e não confinada do aquífero.

4.5 Madeira e Porto Santo

- **Prospecção e Captação de Águas Subterrâneas em Terrenos Vulcânicos - Arquipélago da Madeira**: por Raúl António Simões Duarte

O autor caracteriza monograficamente o arquipélago da Madeira do ponto de vista hidrogeológico. Da sua comunicação salienta-se o seguinte:

Com a finalidade de se dar a conhecer as potencialidades e o comportamento dos sistemas aquíferos ocorrentes no Arquipélago da Madeira, procurou-se definir as unidades hidrogeológicas mais representativas, utilizando-se como critérios os aspectos estratigráficos, o tipo de litologia prevalecente, a ocorrência de estruturas geotectónicas e a variabilidade espacial dos valores de permeabilidade e da porosidade.

*Na **ilha da Madeira** estabeleceram-se quatro manchas correspondentes às unidades cartografadas, onde foram instaladas numerosas captações. Áreas favoráveis à infiltração: correspondem a zonas planálticas, com formações de elevada permeabilidade e nas quais existe um sistema de fracturação importante associado à ocorrência de aparelhos vulcânicos. Outro factor característico é a elevada pluviosidade e a presença de grande concentração de humidade atmosférica.*

As principais áreas individualizadas são o Maciço do Paúl da Serra; Chão dos Balcões - João do Prado; Cedro - Pico do Areeiro; Achada do Teixeira e Santo da Serra.

*Na **ilha de Porto Santo** as formações vulcânicas apresentam diminuta permeabilidade, enquanto que as sedimentares não permitem a acumulação de reservas aquíferas, dada a pequena e irregular espessura. As captações do tipo poço com galeria, constituem as origens de água mais produtivas e de melhor qualidade química, no entanto, com produção média diária total da ordem de 465m^3 e com teores de cloretos entre 300 e 800 mg/l. Ocorrem algumas pequenas emergências de carácter sazonal com produtividades diminutas, encontrando-se na zona sudoeste e nordeste duas galerias com extensões da ordem dos 500m, mas com produtividades de 50 a 18 m^3/d e cloretos entre 3000 e 2000 mg/l. As produtividades obtidas variaram entre 8 e 15 l/s, junto à foz da Ribeira do Tanque, tendo-se captado um caudal de 19 a 40 l/s na foz da Ribeira da Ponta.*

4.6 Algarve

- **Uso Combinado de Dados Hidrogeológicos e Hidroquímicos para Explicar a Composição da Água Subterrânea Observada nos Terrenos Irrigados da Campina de Faro, Algarve**: por T.Y. Stigter; V.E.A. Post; S.P.J. Van Ooijen; C.A.J. Appelo e A.M.M. de

Carvalho Dill

Os autores desenvolvem uma análise hidrogeoquimica e de balanço hídrico do sistema aquífero da campina de Faro. Da sua comunicação salienta-se o seguinte:

*Na Campina de Faro, Algarve, as práticas agrícolas têm grande influência na composição das águas subterrâneas. As concentrações de nitratos aumentaram fortemente devido à aplicação (*intensiva*) de fertilizantes. A água em excesso, proveniente das práticas de irrigação, volta ao aquífero e mistura-se com a água do sistema regional de água subterrânea. Esta água é fortemente concentrada devido à elevada evapotranspiração e à lavagem de fertilizantes. O aumento da concentração induz a precipitação de calcite e a troca catiónica, sendo o Ca substituído pelo Na no complexo de troca do solo. É possível simular esta evolução hidroquímica através de um modelo geoquímico. A mistura de águas no aquífero permite a aplicação de um modelo de 'mixing cell', que pode ser usado para calcular as transmissividades e a alteração da concentração de Cl no tempo, através do balanço de massa de Cl. Os resultados dos cálculos encontram-se aparentemente de acordo com as observações hidroquímicas. Perto da costa, a sobreexploração dos aquíferos provoca a intrusão da água do mar o que aumenta a concentração de Cl e induz a troca catiónica.*

4.7 Ribatejo, Oeste e Vale do Tejo

- **Pesticidas e Nitratos em Águas Subterrâneas na Região do Ribatejo e Oeste em 1996:**

por Sofia B.A. Batista; Maria José A.P.A. Cerejeira; Ascensão Trancoso; Maria São Luis Centeno e António Manuel S. Silva Fernandes

Os autores desenvolvem uma interessante e original análise aos pesticidas e nitratos das águas subterrâneas do Ribatejo e do Oeste. Da sua comunicação salienta-se o seguinte:

Na sequência de estudos realizados no nosso país, que evidenciaram contaminações com aqueles produtos nalgumas zonas agrícolas do Ribatejo, procedeu-se a um estudo mais abrangente no Ribatejo e Oeste (no âmbito do projecto PAMAF-IED nº 4024), cujos resultados obtidos em 1996 se apresentam.

Para amostragem da água subterrânea foram seleccionados 144 furos, 55 de abastecimento público e 89 de rega, com o apoio dos técnicos das várias Zonas Agrárias da Direcção Regional de Agricultura do Ribatejo e Oeste (DRARO) e/ou dos Serviços Municipalizados de diversas Câmaras Municipais.

Recorreu-se à técnica ELISA ("enzyme-linked immunosorbent assay") para uma triagem inicial de amostras e procedeu-se à confirmação de resultados positivos por cromatografia gasosa (GC). Foram detectados por GC e confirmados por espectrometria de massa resíduos dos herbicidas alacloro, atrazina, metolacloro, metribuzina e simazina, tendo sido doseados níveis máximos respectivamente de 4,59 µg/L, 0,60 µg/L, <0,05 µg/L, 0,22 µg/L e 0,35 µg/L. Em 14% das amostras analisadas por GC foram doseados níveis de resíduos superiores a 0,1 µg/L, de pelo menos um dos pesticidas em análise, em particular de alacloro e simazina, em amostras de água para consumo humano, e de alacloro, atrazina, metribuzina e simazina, em amostras de água recolhidas em furos de rega.

Relativamente à atrazina, observa-se que nas regiões do Baixo Sorraia e Lezíria do Tejo a contaminação persiste a níveis que se encontram dentro dos valores anteriormente detectados.

Em relação à determinação da concentração do ião nitrato verificou-se que em 20% das amostras de água para consumo humano e em 34% das amostras de água para rega o VMA de NO_3^-, respectivamente de 50 mg/L e 30 mg/L, foi ultrapassado.

- **A Geofísica na Protecção dos Recursos Hídricos. Mapeamento de Zonas de Risco no Vale do Tejo-Sado Recorrendo a Prospecção Geoeléctrica:** por Rui M. D. Gonçalves e António R. Andrade Afonso

Os autores desenvolvem uma análise das zonas mais ou menos permeáveis no Vale do Tejo interpretando levantamentos geoeléctricos. Complementarmente comparam figuras de prospecção de aquíferos com qualidade da água. **É interessante comparar a figura 6 desta comunicação que apresenta a superfície representativa do *"parâmetro protecção"* com as figuras 1 e 4 apresentadas na comunicação do autor sobre a "v*ulnerabilidade à poluição*" para os aquíferos da região** (*cf.* 3.10). Da comunicação salienta-se o seguinte:

O solo não tem capacidade natural de "absorver" esta enorme quantidade e diversidade de poluição, e assim é de esperar um aumento crescente de poluentes nas águas subterrâneas. A delimitação de zonas onde a infiltração ocorre com maior ou menor facilidade, é fundamental para a correcta planificação do uso do solo e sua protecção. Para se conseguir esse mapeamento é necessário o estudo de parâmetros que caracterizam o solo.

A prospecção geoeléctrica existente (de levantamentos do INAG e da FCUL) cobrem grande parte do vale do Tejo-Sado. Os dados existentes dizem respeito a Sondagens Eléctricas Verticais (SEV), que são perfeitamente adequadas ao meio em estudo, isto é, um meio estratificado horizontalmente.

Dos resultados obtidos podemos concluir que, em larga escala, a zona sul do vale do Tejo-Sado (península de Setúbal), está menos protegida em relação à infiltração de poluentes, por exibir uma maior resistividade superficial (maior conteúdo em areias) e menor conteúdo em camadas argilosas. Também na região de Santarém e Coruche se verifica uma menor protecção.

O uso de sondagens eléctricas verticais constitui outra ferramenta na abordagem do problema da delimitação de zonas onde a infiltração de poluentes é facilitada. No entanto, a interpretação integrada de toda a informação litológica existente para o vale do Tejo-Sado, permitirá uma melhor visualização do problema, uma vez que a densidade de furos existentes é muito grande.

4.8 Beiras

- **Interpretação Preliminar de Dados Isotópicos de Carbono em Águas Minerais da**

Região das Beiras: por M. J. F. Morais e J. Silar

Os autores desenvolvem uma análise isotópica de carbono inorgânico dissolvido em águas minerais da região das Beiras. Da sua comunicação salienta-se o seguinte:

Integrado num projecto de estudo das águas minerais bicarbonatadas-sódicas, sulfúreas, que ocorrem nos granitos Hercínicos da região das Beiras (Centro de Portugal), foi realizada a caracterização isotópica do carbono inorgânico dissolvido (CID), com recurso à determinação do $\delta^{13}C$ e do ^{14}C e o objectivo de definir as fontes do carbono.

Os valores de $\delta^{13}C$ ($^{0}/_{00}$ PDB) até agora obtidos, mostram um intervalo de variação entre os -17 e -12 $^{0}/_{00}$, traduzindo um enriquecimento em ^{13}C, quando comparados com os valores da relação $^{13}C/^{12}C$ obtidos para águas subterrâneas de infiltração recente (-22 a -19 $^{0}/_{00}$). Verifica-se, uma tendência geral, de enriquecimento no $\delta^{13}C$ a acompanhar um aumento no conteúdo em bicarbonato.

4.9 Minho

- **Ocorrência Discreta de Águas Férreas em Fraião-Braga, NW de Portugal. Modelo Hidrogeológico Conceptual**: por Alberto S. Lima; Jorge V. Pamplona; Carlos S. Alves e Manuel O. Silva

Os autores apresentam um modelo conceptual do funcionamento hidrogeológico da região Fraião-Braga, dando especial ênfase à análise de águas férreas. Da sua comunicação salienta-se o seguinte:

Os resultados obtidos sugerem um modelo hidrogeológico conceptual para a ocorrência das águas férreas nesta área que pode sintetizar-se do seguinte modo: no decurso da alteração dos minerais ferromagnesianos das rochas da região de Fraião-Braga - granitos biotíticos encaixados num metassedimento silúrico, parcialmente recobertos por depósitos aluvionares de pouca possança - liberta-se ferro que entra na circulação subterrânea; as condições de Eh-pH determinam a estabilidade do Fe^{3+}, formando compostos muito pouco solúveis que se acumulam no depósito de cobertura e, em condições favoráveis, são reduzidos pela matéria orgânica a Fe^{2+}, muito mais solúvel, aumentando a concentração de ferro nas águas subterrâneas. A ocorrência de águas férreas no sector estudado é discreta, estando relacionada com a existência de microambientes redutores.

Efectuados os balanços hídricos ao nível do solo (capacidade de campo = 100 mm pela metodologia sequencial de Thornthwaite e Mather ... verifica-se que a precipitação (P) total em 1995-96 corresponde a 123% da normal climatológica deste parâmetro, que se traduz num valor de superavit (1300 mm), que é 44% superior ao da série considerada (900 mm). De notar ainda o pico pluviométrico registado em Maio de 1996... A infiltração eficaz estima-se em 870 mm, considerando um coeficiente de escoamento superficial de 0.33 durante o período em que ocorre superavit hídrico. No entanto, dado que o nível freático atinge frequentemente a superfície topográfica, devido à fraca capacidade de armazenamento do aquífero, a infiltração eficaz será substancialmente mais baixa e o escoamento superficial

mais elevado.

4.10 Trás-os-Montes

- **Influência das Actividades Antrópicas na Qualidade das Águas Subterrâneas. Casos de Trás-Os-Montes Oriental (Primeira Abordagem)**: por Luís Filipe Pires Fernandes e Manuel de Oliveira da Silva

Os autores desenvolvem uma análise da influência de actividades antrópicas na qualidade das águas da zona não-saturada do solo, apresentando resultados muito interessantes. Da sua comunicação salienta-se o seguinte:

Este trabalho, reflecte uma primeira abordagem de um estudo que estamos efectuando na bacia do rio Fervença. Pretende-se com este estudo, fazer uma avaliação das actividades antrópicas mais significativas e qual o seu significado e impacto nos recursos hídricos.

Do ponto de vista hidrogeológico a região é caracterizada pela existência típica de aquíferos de rochas físsuradas, com o aparecimento pontual de alguns aquíferos em materiais porosos como sejam algumas zonas aluvio/coluvionares.

Directamente ligado com as águas subterrâneas, existe actualmente uma maior preocupação com o papel que representa a zona não-saturada, daí que se tenham desenvolvido algumas técnicas para extracção de água dessa zona, principalmente através de cápsulas de cerâmica com vácuo, técnica que estamos utilizando em 6 estações.

A solução extraída foi analisada, tendo-se tido como preocupação principal a pesquisa de elementos mais utilizados nos fertilizantes químicos.... Como primeira leitura nota-se um nítido control do tipo de solo na distribuição dos diversos metais pesados analisados.

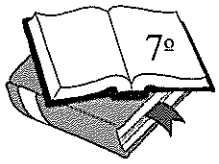
5. CONCLUSÕES

A concretização (e a incorporação dos conhecimentos adquiridos) dos numerosos estudos em curso em todas as regiões do País sobre **Recursos Hídricos Subterrâneos**, parte significativa dos quais se sumariza neste Capítulo, paralelamente com novos estudos de Investigação Programada a iniciar nos próximos 5 anos, de 1999 a 2004, permitirá seguramente responder aos desafios da União Europeia em matéria de cumprimento das exigências e desafios que se põem a Portugal para cumprimento do ***Programa de Acção para a Protecção e a Gestão Integrada das Águas Subterrâneas*** (*Action Programme for Integrated Groundwater Protection and Management, GAP*), descrito no Capítulo Terceiro. Pela sua importância e dimensão, dever-se-á dar especial relevo aos quinze **Planos de Bacia Hidrográfica** e ao **Estudo dos Recursos Hídricos Subterrâneos do Alentejo**, em curso até (provavelmente)

finais do Segundo Milénio.

No Capítulo Nono apresentar-se-á um **Programa de Estudos** que se pretende venha a contribuir para colmatar lacunas de Investigação Programada detectadas durante a elaboração desta revisão sobre *Investigação Recente Sobre Águas Subterrâneas em Portugal.*

CAPÍTULO SÉTIMO



OS DESAFIOS DA UNIÃO EUROPEIA QUANTO À INVESTIGAÇÃO E AO AMBIENTE NO DOMÍNIO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Resumo do Capítulo

O capítulo foi dividido em duas partes. Na Parte I apresentam-se as grandes linhas das acções comunitárias, os objectivos científicos e tecnológicos e as prioridades da investigação comunitária no domínio das águas subterrâneas, definidos pelo Conselho de União Europeia para o Quinto Programa-Quadro, pela sua Decisão de 14 de Dezembro de 1998.

Na Parte II do capítulo apresentam-se discussões, conclusões e recomendações para acções comunitárias de investigação concretizáveis em projectos ou em acções concertadas de investigação. Destacam-se as acções que permitem focar, a nível da Europa, as linhas de investigação mais carenciadas no domínio dos recursos hídricos subterrâneos, que **contaram com a colaboração do autor** para a definição de prioridades da investigação comunitária no domínio da água.

Com este Capítulo Sétimo, pretende-se contribuir para um melhor conhecimento dos temas de investigação prioritários na União Europeia, visando o reforço das actividades nacionais de investigação em recursos hídricos subterrâneos, no contexto da **vontade política actual de incrementar a acção portuguesa de investigação na Europa.**

OS DESAFIOS DA UNIÃO EUROPEIA QUANTO À INVESTIGAÇÃO E AO AMBIENTE NO DOMÍNIO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

PARTE I : GRANDES LINHAS DAS ACÇÕES COMUNITÁRIAS OBJECTIVOS CIENTÍFICOS E TECNOLÓGICOS E RESPECTIVAS PRIORIDADES (1999-2002)

1. TEMAS E ORGANIZAÇÃO DO QUINTO PROGRAMA-QUADRO DE INVESTIGAÇÃO

1.1 Considerações Gerais

Visando caracterizar as grandes linhas das acções comunitárias, os objectivos científicos e tecnológicos e as respectivas prioridades, para o período (1999-2002), apresenta-se nesta Parte I do Capítulo Sétimo, um extracto da decisão do Parlamento Europeu e do Conselho relativa ao Quinto Programa-Quadro de acções da União Europeia em matéria de Investigação, de desenvolvimento tecnológico e de demonstração. O Concelho da União Europeia, pela sua Decisão de 14 de Dezembro de 1998, publicada no Jornal Oficial das Comunidades Europeias (JO) L 7, de 13 de Janeiro de 1999, adoptou um Programa-Quadro de acções no domínio da energia (incluindo a protecção do ambiente) para o período 1998-2002. No Jornal Oficial das Comunidades Europeias (JO) L 26, de 1 de Fevereiro de 1999, vem publicado, entre outros, o seguinte Acto comunitário:

- Decisão 182/1999/CE do Parlamento Europeu e do Concelho, de 22 de Dezembro de 1998, relativa ao Quinto Programa-Quadro de acções da Comunidade Europeia em

matéria de investigação, de desenvolvimento tecnológico e de demonstração (1998-200, JO L 26, pp. 1-31).

O Quinto Programa-Quadro de Investigação compreende quatro acções:

- a primeira acção abrange os programas de investigação, de desenvolvimento tecnológico e de demonstração,
- a segunda acção visa promover a cooperação em matéria de investigação, de desenvolvimento tecnológico e de demonstração com países terceiros e com organizações internacionais,
- a terceira acção diz respeito à difusão e valorização dos resultados das actividades em matéria de investigação, de desenvolvimento tecnológico e de demonstração,
- a quarta acção tem por objectivo o incentivo à formação e à mobilidade dos investigadores.

1.2 CONTEÚDO E ORGANIZAÇÃO DA PRIMEIRA ACÇÃO

1.2.1 Considerações Gerais

Os programas de investigação, de desenvolvimento tecnológico e de demonstração compreendem:

- "**acções-chave**";
- actividades genéricas de **investigação e** de **desenvolvimento** tecnológico;
- actividades de apoio às **infra-estruturas de investigação.**

No quadro destes programas será dada, especial atenção às implicações socio-económicas da implementação, utilização e consequências das tecnologias, processos e cenários abrangidos por cada um dos programas. Como parte integrante das actividades desenvolvidas no âmbito da primeira acção, será realizada a necessária investigação socioeconómica. Serão envidados muito particularmente esforços no sentido de assegurar a coerência entre estas acções, a fim de optimizar a exploração e difusão dos resultados pelos utilizadores. Estas acções serão completadas por uma investigação socioeconómica a nível das questões horizontais,

desenvolvida no âmbito da quarta acção.

Além disso, no quadro de uma abordagem coerente e coordenada com as segunda, terceira e quarta acções, os programas desenvolverão, nos seus domínios respectivos, actividades que contribuam para os objectivos dessas acções.

1.2.2 "Acções-chave"

As **acções-chave** serão concebidas em função dos problemas, devendo ser claramente definidas em função dos critérios e orientadas especificamente para os objectivos de cada programa e para os resultados pretendidos, tendo em consideração as opiniões dos utilizadores. Terão igualmente uma perspectiva claramente europeia. A **acção-chave** é considerada como um conjunto de projectos (de maior ou menor envergadura) de investigação aplicada, genérica e eventualmente de base, dirigidos a um desafio ou problema comum europeu, sem excluir as questões de carácter planetário.

As actividades de investigação desenvolvidas neste contexto integrarão todo o espectro das disciplinas necessárias à concretização dos objectivos, da investigação fundamental à demonstração, passando pelo desenvolvimento. Será prestada a devida atenção às articulações adequadas com as iniciativas nacionais e internacionais pertinentes (incluindo os quadros complementares europeus de IDT).

1.3 CONTEÚDO E ORGANIZAÇÃO DAS SEGUNDA, TERCEIRA E QUARTA ACÇÕES

Os temas "**horizontais**" surgem na intersecção entre a política de investigação da Comunidade e as suas políticas em matéria de relações externas, inovação, PME e recursos humanos, bem como nas questões sociais e de emprego.

Em cada um deles incluem-se:

- acções específicas - que poderão incluir, se necessário, accões-chave - associadas aos objectivos gerais da política da Comunidade em matéria de relações externas, inovação, PME e recursos humanos que não possam ser integradas nos temas da primeira acção;

- acções que assumam essencialmente a forma de actividades de coordenação, de apoio e de enquadramento com o objectivo de assegurar a coerência das acções de natureza equivalente

realizadas no âmbito dos temas da primeira acção.

Em coordenação e interacção com os programas horizontais, os programas temáticos adoptarão as medidas necessárias para contribuírem de forma activa, no contexto das suas próprias actividades, para a concretização dos objectivos gerais dos programas horizontais.

O apoio comunitário às infra-estruturas de investigação no âmbito da quarta acção centrar-se-á especialmente em medidas que melhorem o acesso a tais estruturas.

2. ENERGIA, AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

2.1 Considerações Gerais

A investigação e o desenvolvimento tecnológico no domínio do ambiente, bem como a gestão sustentável dos recursos do ecossistema, são essenciais para a implementação das políticas da União. A utilização dos conhecimentos e tecnologias adequados tornará possível satisfazer um vasto leque de necessidades. Os resultados deste tipo de investigação proporcionarão uma base para a elaboração de políticas a nível comunitário ou que derivem de tratados internacionais.

2.2 Ambiente e desenvolvimento sustentável

2.2.1 "Acções-chave"

2.2.1.1 Gestão sustentável e qualidade da água

A presente acção tem por objectivo produzir os conhecimentos e as tecnologias necessárias para uma gestão racional dos recursos hídricos para usos domésticos, industriais e agrícolas. De entre os domínios em causa citar-se-ão prioritariamente:

- As tecnologias de tratamento e de saneamento para a prevenção da poluição, o saneamento da água e sua utilização e/ou reutilização racional (incluindo os circuitos fechados e a fiabilidade das redes de distribuição); **a gestão integrada dos recursos hídricos e das zonas húmidas**;

- As tecnologias de controlo e prevenção da poluição, **protecção e gestão dos recursos dos lençóis freáticos** e das águas superficiais, incluindo os aspectos da qualidade ecológica;
- Os sistemas de observação, de alerta precoce e de comunicação;
- As tecnologias de regulação e gestão das reservas e as tecnologias para as zonas áridas e semi-áridas e **regiões com défice de água em geral.**

2.2.1.2 Mudanças globais, clima e biodiversidade

O objectivo desta acção consiste em desenvolver a base científica e tecnológica e os instrumentos necessários para apoiar a execução, das políticas da UE nomeadamente os Programas de Acção Ambiental da CE e a Estratégia de Biodiversidade, e as obrigações em matéria de investigação decorrentes dos Tratados e Convenções Internacionais assinados pela CE e pelos seus Estados-Membros. Globalmente, a acção-chave procura aumentar os conhecimentos nestas áreas para ajudar a atingir o objectivo comunitário de desenvolvimento sustentável, sempre que possível em colaboração com a indústria. É prioritário nesse contexto:

- Compreender, detectar, avaliar e prever os processos de mudança global, com destaque para as causas e incidências europeias e sub-regionais, em relação tanto aos fenómenos naturais como antropogénicos e no contexto da utilização sustentável dos recursos naturais. Serão utilizadas as ciências naturais, as socioeconómicas e, quando pertinente, as culturais;
- Promover uma melhor compreensão dos ecossistemas terrestre e marinho e das interacções entre estes e outros ecossistemas;
- Desenvolver cenários e estratégias de prevenção, atenuação e adaptação às mudanças globais e às alterações climáticas e de conservação da biodiversidade no contexto do desenvolvimento sustentável;
- Apoiar o desenvolvimento de uma componente europeia dos sistemas mundiais de observação do clima, dos ecossistemas terrestres (incluindo a biodiversidade) e dos oceanos (por exemplo, Euro-GOOS).

2.2.1.3 Ecossistemas Marinhos Sustentáveis

A presente acção tem por objectivo promover uma gestão integrada e sustentada dos recursos marinhos e contribuir para os aspectos marinhos do Quinto Plano de Acção no Domínio do Ambiente. Será assegurada a sinergia com outras actividades pertinentes do Programa-Quadro através de um mecanismo de coordenação específico.

A investigação será orientada, nomeadamente, para o tema do controlo e gestão dos fenómenos costeiros para minorar os efeitos da poluição, das inundações e da erosão, especialmente nas zonas costeiras frágeis, e para facilitar a conquista de terra ao mar.

PARTE II : APRESENTAÇÃO DE DISCUSSÕES, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA ACÇÕES COMUNITÁRIAS DE PROJECTOS DE INVESTIGAÇÃO OU PARA ACÇÕES CONCERTADAS DE INVESTIGAÇÃO

3. PREPARAÇÃO DE UMA REDE DE MONITORIZAÇÃO. PROGRAMA DE ACÇÃO INTEGRADA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Apresenta-se, em seguida, um extracto do relatório de GANOULIS *et al.* (1992), intitulado "***Preparation of a Network on Monitoring. EC Groundwater Action Plan***" *(distributed by DGXI as Annex 3 of the Draft Agenda for the meeting of Experts concerning a Groundwater Action Programme (GAP), held in Brussels, Dec. 1, 1993)*, que **contou com a colaboração do autor**:

Uma vez que a utilização da água e os problemas associados, não são apenas de âmbito local, as actividades de monitorização e as bases de dados deverão ser desenvolvidas a nível regional ou nacional. Não é certamente tarefa da Comissão Europeia estabelecer uma rede de **monitorização das águas subterrâneas**, numa base supra-nacional. As bases de dados devem ser restringidas a nível regional ou nacional (para os países mais pequenos). As acções

da Comissão Europeia para a melhoria e para a compatibilidade das redes nacionais ou regionais deverá ser estabelecida de acordo com o princípio da subsidiariedade, i.e. que as decisões sejam tomadas ao nível político mais baixo possível. Será tarefa das autoridades locais, regionais ou nacionais, **publicar regularmente relatórios sobre o estado das águas subterrâneas**. Obviamente que estes relatórios devem adequar-se à produção de relatórios comunitários, *e.g.* o estado das águas subterrâneas da União Europeia. Das considerações tecidas ressalta que:

- As regiões da União Europeia e os Estados-Membros têm interesse próprio em desenvolver **redes de monitorização de águas subterrâneas**, básicas ou de referência.
- As redes nacionais ou regionais devem produzir resultados fiáveis e comparáveis a nível europeu.

A cooperação e a permuta de informação entre as redes básicas deveriam possibilitar uma acção a nível de toda a União Europeia, que se poderia intitular ***Coordinated Groundwater Monitoring (CGM)***.

GANOULIS *et al.* (1992) sugeriam que os objectivos de monitorização na Comissão Europeia fossem:

- Desenvolver a colaboração entre os Estados-Membros de forma a harmonizar os elementos necessários à monitorização das águas subterrâneas.
- Ajudar os Estados-Membros a assegurar a fiabilidade e a compatibilidade dos resultados a nível nacional ou regional, para poder avaliar, publicar os resultados, e obter uma pintura representativa da situação das águas subterrâneas em toda a União Europeia, conforme se obriga nas Directivas Comunitárias.

Com a **adopção em 10 de Julho de 1996** pela Comissão Europeia do **Programa de Acção Integrada das Águas Subterrâneas** (GAP), tais sugestões vieram a ser contempladas. Mais recentemente, em 1998, a Directiva Quadro da Água, veio dar força de lei às linhas de acção recomendadas pelo GAP.

4. EUROPEAN WORKSHOP ON RESEARCH AND TECHNOLOGICAL DEVELOPMENT FOR FRESHWATER RESOURCES MANAGEMENT IN THE COMMUNITY

Visando dar a conhecer as principais linhas de investigação sugeridas ao Conselho Europeu pelo *European Workshop on Research and Technological Development for Freshwater Resources Management in the Community*, apresenta-se em seguida um extracto do ***Rapporteurs' Reports*** elaborado por REINIGER e LOBO-FERREIRA (1992):

In this section we present an extract of the Rapporteurs' Reports (Chairman: Peter Reiniger (DG XII, Env.R&D, B); Rapporteur: J.P. Lobo Ferreira (LNEC, P) of the Specific Sessions on Science and Technology of the SAST 6 European Workshop on Research and Technological Development for Freshwater Resources Management in the Community, organised in Lisbon, on May 11-13, 1992, by LNEC (the Portuguese Civil Engineering Laboratory) and JNICT (the Portuguese Scientific and Technological Research Board), with the purpose of bringing together, from different parts of the Community, high level decision makers, senior policy advisers and analysts, and technical experts with different backgrounds (environment, agriculture, regional policy, industry) to debate SAST's findings and draft recommendations.

The session was to deal with current developments in conventional areas of SCIENCE AND TECHNOLOGY such as ***hydrology, geology, engineering****, or in emerging and enabling technologies such as biotechnology, new materials, and IT (information technology), which could enhance RTD potential for freshwater resources management in the Community. Shortcomings in the Community as regards knowledge in scientific and/or technological bases were to be highlighted and discussed as well as practical problems such as availability or non-availability of human resources and the difficulty of setting up multidisciplinary research teams as required.*

A general and important question discussed during this session was how to make Freshwater Resources research more effective in the Community. There was a general feeling that a new specific EC Water Resources Programme should be created. Items considered important for this programme were:

- *Integrated research at the different space and time scales.*
- *Economic and social sciences researched from the Water Resources (WR) point of view.*

It was proposed that this specific Water Resources R&D programme could consist of:

- *a core programme (that is, a programme containing topics not included in other specific programmes) of integrative research on generic technologies for the Management of Water Resources; this research should be concentrated largely on a limited number of "**Workshop Sites**" or "**Pilot Areas**", e.g., watersheds or regions.*
- *a coordination of research carried out in the other Community Research Programmes (wastewater treatment, clean technologies, materials) which is relevant to water resources, in order to ensure its coherence.*

On data collection, it was felt that more important than collecting more data is filling up

missing data and making existent data easily available, compatible and coherent. However, sensors for water quality data acquisition and information systems for data storage and processing are important, as mentioned in the SD, but there is no need to standardize data collection. It is already well done in countries like Germany or Denmark, which could prove little inclined to change their systems. Know-how transfer and training are fundamental within EC countries and compatibility and availability of data for research is a major problem that must be solved.

The individual research areas highlighted in the SD were ranked by participants' vote in three categories:

1 - Very important, must be included in future programmes or projects;

2 - Important, could be included in future projects;

3 - Not important, not to be considered for future projects.

*After votes were counted, the following areas were included in category 1 (**very important**):*

- ***Modelling and monitoring techniques for freshwater systems (especially ground waters and sediments).***
- *Modelling and monitoring ecological demand.*
- *Techniques to allow wider application of water reuse.*
- *Pollution prevention measures within industry and agriculture.*

Category 3, the areas found to be insufficiently important to warrant consideration in future projects, included:

- *Desalination.*
- *Pipe leakage detection and remediation techniques.*
- *Sludge reduction/treatment techniques.*

All other areas were included in category 2.

Additional items also considered important by the participants, as research topics to be addressed in future EC programmes or projects were:

- ***Unsaturated zone, for which there is a lack of basic data.***
- ***Fractured media: flow and pollution.***
- ***Nitrate pollution: what to do if the concentration is already too high?***
- ***Point pollution vs. non-point pollution.***
- ***Reclaiming polluted aquifers.***
- ***Recharge of aquifers: natural and artificial. Quality problems of final water.***
- *Regional and international water resources transfer.*
- *Evaluation of environmental impacts relating to water resources transfers.*

5. CONTRIBUIÇÃO PORTUGUESA PARA A TASK FORCE ÁGUA-AMBIENTE

5.1 Considerações Gerais

Contribuindo para a análise das prioridades de investigação no domínio da água, a incluir no **V Programa Quadro de Investigação**, desenvolveu-se em Portugal, no âmbito da **Task Force Ambiente e Água** da Comissão Europeia (DGXII/JRC), uma reflexão aprofundada com base nos quatro eixos propostos pela Task Force: "*luta contra a poluição*", "*uso racional da água*", "*luta contra défices de água*" e "*prevenção e gestão de crises*". Esta iniciativa foi desenvolvida pela JNICT e pelo LNEC em colaboração com os Delegados Nacionais ao Programa Ambiente e Clima.

Para tal foram solicitadas contribuições escritas, para cada uma das áreas mais relevantes, a um grupo seleccionado de cerca de cinquenta investigadores portugueses. As respostas recebidas foram posteriormente apresentadas, votadas e discutidas num Workshop realizado em Lisboa, a 28 de Janeiro de 1997, intitulado "O Programa Quadro e a Investigação no Domínio Ambiente e Água".

O Workshop contou com a participação de cerca de quarenta investigadores, tendo tido em consideração quatro áreas principais de investigação: "recursos hídricos", "saneamento básico", "água e agricultura" e "ambiente e indústria e a importância das ciências sociais e humanas".

Na secção seguinte apresenta-se um extracto do *Executive Summary* da *Portuguese Contribution to the Task Force Environment • Water*, elaborado por MELO BAPTISTA e LOBO-FERREIRA (1997) (disponível em http://www.dh.lnec.pt/gias/novidades/tfewE.html), contendo o consenso obtido sobre as linhas de investigação prioritárias.

5.2 Executive Summary da Portuguese Contribution to the Task Force Environment • Water

The aim of this section is to provide Portuguese Contribution on priority research areas, in the framework of WORKING PAPER ON WATER ISSUES based on the Portuguese

Contribution to the DGXII/JRC Task Force Environment and Water, held in Lisbon, Portugal, during 1997. The research areas are presented according to the four axes proposed by the Task Force, namely the "fight against pollution", "rational use of water", "fight against water deficits" and "prevention and management of crises".

Four major Portuguese environment and water research areas, namely "water resources", "water supply, wastewater collection and treatment", "water and agriculture" and "environment and industry, including the relevance of social and human sciences" are addressed in this section.

The final output of this report is the following recommended priority research areas in Environment and Water in Portugal, according the four axes:

- ***The fight against pollution (Axis A):*** *integrity and multi-functionality of water systems;* ***preservation and rehabilitation of groundwater quality****; indicators for the assessment of the state of the environment and for decision support systems; better management tools and operation and maintenance practices for water storage, transportation and distribution of water, water treatment for human consumption, wastewater collection and wastewater treatment; advanced water and wastewater treatment processes on specific pollutants removal and alternative techniques to the desinfection by chlorine and control of their by-products; dosing control and recovering of chemical products used on the treatment process and production minimisation, treatment and final disposal of sludge from the treatment process; water quality control inside the network and storage tanks; understanding of the behaviour, degradation and durability of materials, their interaction with the wastewater and the soil, and the development of rehabilitation technologies; analytical control and monitoring methodologies of water quality parameters, with the development of new analytical techniques namely to allow the identification of new pollutants; water-quality management in agriculture; agricultural systems performance and crop yield; economic evaluation of water pollution policy; clean technologies, with low water use and using chemical products which may minimise negative environmental impacts; environmental up-grading of water systems, with special emphasis on* ***in situ remediation of polluted*** *surface and* ***groundwater*** *as a result of industrial activities; environmental sustainability indicators, their identification and definition considering the specificity of the different industrial activities.*

- ***Rational use of water (Axis B)****: river and reservoirs surface water quality modelling;* ***sanitary protection of surface and groundwater abstraction for domestic purposes****; integrated management of water and wastewater systems supported by reliable decision support systems, geographical information systems and performance indicators; sampling, recording, storage and processing of information, inspection and diagnosis of underground infrastructures and digital mapping; unaccounted for water detection and control, with the minimisation of distribution network losses by improvement of methods for leak prevention, detection and repair; sizing analysis of water and wastewater systems, scale effects and articulation with territory and urban planning; modernisation and user participation in planning and management of irrigation and drainage systems; technology and regulation for use of saline and wastewater in irrigated agriculture; water savings in irrigation and drainage systems and systems performance; rainfed agricultural water management; impact assessment studies for water use policy measures; impact assessment for the privatisation of some water use services; preventive actions to minimise water consumption and the production of wastewater; recovery, reuse and proper selection of chemical products to prevent or minimise environmental damage.*

- ***Fight against water deficits (Axis C)**: planning and management of water resources systems; basin wide integrated water-resources planning; conflicts of interest in managing trans-boundary water resources; **physical and economic integrated management of groundwater and surface waters**; institutional, socio-economic, policy issues and human resources development; environmental impacts of water use in agriculture; **methodologies for environmental impact assessment on surface and groundwater**; water pricing.*
- ***Prevention and management of crises (Axis D)**: emergency situations with negative environmental impacts, by focusing on systems management during natural or man-induced hazards; management of flood risks originated from dam breaking; information, mainly through monitoring, risk assessment and management, use of decision support systems and use of information systems and technologies.*

6. EUROPEAN SCIENCE FOUNDATION - GROUDWATER POLUTION (Gpoll)

6.1 Considerações Gerais

Em Maio de 1998 realizou-se em Estrasburgo a reunião de lançamento do **Grupo de Poluição de Águas Subterrâneas (GPoll)** da Fundação para a Ciência Europeia (ESF), tendo Portugal sido **representado pelo autor**. De acordo com o folheto de divulgação, datado de Outubro de 1998, o GPoll é um programa científico da ESF, que actua como catalisador para o desenvolvimento da ciência, juntando cientistas de vanguarda e financiando instituições para debaterem, planearem e implementarem iniciativas pan-europeias.

De acordo com o GPoll, uma fonte limpa e segura de águas de abastecimento é considerada pelas Nações Unidas como um direito fundamental do Homem. Muitos países europeus dependem das águas subterrâneas como fonte para o seu abastecimento de água. À medida que esta água se torna mais e mais poluída, eles encaram duas opções: desenvolver cada vez mais complexos e caros métodos de limpar a água; ou arriscar a degradação ambiental e as consequências inerentes para a saúde púbica por ingestão de água poluída.

GPoll é um programa de longo-prazo que inicia e promove investigação sobre poluição de águas subterrâneas, a nível multinacional e multidisciplinar, originadas por químicos tóxicos, radionuclidos, e excesso de nutrientes. **Foca no destino de poluentes nos sistema aquíferos** devido à sua importância para o ambiente e para saúde humana. A investigação tem urgência por causa da aguda incidência das disfunções relacionadas com a poluição e o aumento dos

danos perversos causados pela poluição aos ecossistemas naturais. Contudo, o efeito danificador da poluição das águas subterrâneas, frequentemente só se torna aparente a longo prazo.

Assim, **o GPoll inclui o planeamento de investigação e monitorização a longo prazo.**

A colaboração europeia fornece valor acrescentado, parcialmente porque a poluição é internacional, e também porque os problemas ambientais requerem uma abordagem de investigação multidiscipinar. Por si só, nenhum país dispõe de toda a experiência necessária. Assim a cooperação internacional entre centros de excelência é essencial para os diferentes domínios do conhecimento. Um dos objectivos do GPoll é encorajar os melhores cientistas das mais diversas disciplinas a envolverem-se na investigação ambiental, e cooperarem internacionalmente.

O ênfase do GPoll é na investigação fundamental e estratégica que tenha potencial para utilizar a água subterrânea, nomeadamente da destinada ao abastecimento, mantendo-a limpa na origem.

A prevenção de espécies específicas de poluição requer investigação urgente, para se determinar o destino e o impacto do poluente, ou da mistura de poluentes. Só então, se terá uma base para acções de reabilitação que os degradem, imobilizem ou contenham.

Na primeira reunião do GPoll, em Maio de 1998, decidiu-se organizar uma conferência, em Göteborg, na Suécia, para discussão e detecção de carências de investigação sobre poluição de águas subterrâneas.

6.2 A Conferência GPoll de Göteborg 1998

6.2.1 Considerações Gerais

Apresenta-se em seguida um extracto das conclusões do "*Workshop on Research Needs in Groundwater Pollution*" organizado pelo Comité "*Groundwater Pollution*" da "*European Science Foundation*", em Göteburg, na Suécia, em Novembro de 1998, nomeadamente as conclusões do *Working Group 1: Analysis and detection, physical transport*, que contou com a participação do autor (*cf.* KARSTENS, 1999):

At the first GPoll steering committee meeting mid May 1998 it was decided that a conference should be organised that focussed on urgent groundwater pollution research issues. This

report gives the outcome of that conference identifying to the GPoll steering committee and to scientific community the most urgent and important research tasks for preventing further terrestrial environment and groundwater pollution and for restoring already caused pollution. It was regarded especially important to identify urgent areas of research that presently lack sufficient attention from the scientific and public communities. This task required that documents were prepared in advance of the conference, summarising opinions in various fields of expertise.

6.2.2 Relatórios dos Grupos de Trabalho

Three inter-disciplinary working groups were put together with the task to particularly penetrate two or three of the aims of GPoll and to identify important research areas that GPoll should support.

The groups were:

- *Working Group 1: Analysis and detection, physical transport*
- *Working Group 2: Chemical transformation and immobilisation, biotransformation*
- *Working Group 3: Impact on organisms and ecosystems, remedial measures, prevention.*

6.2.3 Grupo de Trabalho 1

6.2.3.1 Análise e Detecção

Uncontrolled use of organic compounds lead to the occurrence of a new generation of pollutants in the surface and groundwater, such as antibiotics, hormones, halogenated compounds and hydrocarbons, etc. To be able to reliably investigate this kind of pollution at low concentrations, new methodologies need to be developed.

Representative sampling is the basis of any accurate determination of concentration or transformation of these compounds. Interaction of pollutants with solid surfaces is of special concern for their distribution in the subsurface environment. Due to the lack of standardisation of analytical methodology, misleading results can be obtained.

To assess the impact of metals on the environment, special attention should be paid to their speciation.

Molecular microbial diagnostics needs intensive further development if we want to know who is doing what in the ongoing subsurface microbial processes and which are the dominant organisms.

To detect an existing pollution, the limits and the direction of its spreading and the location and extension of its source, sensitive, accurate, quick and cheaper methods have to be developed.

Priority list of research needs with respect to analysis and detection:

1. Standardisation of analysis and detection, especially for organic pollutants.

2. *Develop sampling strategies, particularly for hard rock.*
3. *Accurate determination of very low concentrations of pollutants.*
4. *Increase our understanding of the relevance of low concentrations.*
5. *Interaction between pollutants and suspended matter in groundwater.*

6.2.3.2 Transporte Físico

The relevance of scale and heterogeneity to the conceptualisation and parametrisation of porous media and to an appropriate up-scaling and down-scaling of its models must be further researched by means of the appropriate physical models of these media as well as in-situ to be fully understood.

To properly understand and forecast pollution propagation, porous media characterisation and parameterisation must be made with respect to the mass transport. Media characterisation with this respect is still uncertain in very heterogeneous (fractured and karstic) rocks.

Rock parameter acquisition, relevance and representativeness have still to be improved at the general level.

Flow and mass transport, governing pollution propagation in the groundwater, are dependent on physical, chemical and biological processes. An appropriate coupling of these processes must be achieved as well as a better understanding of process and/or reaction dynamics. Further, the role of suspended matter transported in groundwater as a pollution carrier must be investigated and incorporated.

Priority list of research needs with respect to physical transport:

1. *Characterisation of media for appropriate up-scaling and down-scaling.*
2. *Investigation of transport processes with empasis on the coupling of processes, their reaction dynamics and kinetics.*
3. *The importance of sludge and sediment transport with groundwater.*
4. *Modelling of process integration.*
5. *A posterior analysis of models.*
6. *Optimisation coupling tools.*

6.2.4 Grupo de Trabalho 2

6.2.4.1 Transformações Químicas e Imobilização

Pollution of groundwater is the result of a redistribution of elements or components leading to unacceptable concentration levels. A detailed understanding of the transport is therefore needed for the analysis and prediction of a particular case of groundwater pollution.

The physical transport of pollutants in subterranean systems to the groundwater, e.g. from a point source or a diffuse source, is directly dependent on the speciation, i.e the chemical state

of the particular element or compound. The speciation and any change of it is determined by the over-all biogeosphere processes that govern the hydrochemistry and the transport route. Parameters of particular importance are pH, the redox potential, particularly the presence of redox sensitive elements (Fe, S, As, Se as well as O, N) and the presence of complexing ligands.

The transport of a trace metal depends on the speciation of the solution which is continuously determined by the composition of the aqueous phase. Of particular importance is the formation of stable complexes with organic acids (notably humic substances and other polycarboxylic acids). The trace component is distributed between a stationary solid phase, mobile suspended solid phases and the mobile aquatic phase through adsorption / desorption processes. The suspended solid phase is either a stable mineral or organic / biologic matter of a size in the colloidal range or a precipitate that is formed when a sparingly soluble system exceeds the solubility limit. The kinetics of the distribution is governed by a fairly rapid adsorption, a slow diffusion into the pores and a slow, coupled desorption/ diffusion process. Advection is moving the whole package of water with suspended particulate matter, which is undergoing sedimentation / filtration during the water route.

The adsorption / desorption reflects the complex coupled interactions between the matrix of the solid, colloidal matter forming a surface layer.

This will involve e.g. a negatively charged clay phase interacting with a positively charged oxide surface, organic matter (negatively charged at pH above pKa) and the dissolved trace constituent (organic as well as inorganic).

Research areas to address enabling an understanding of the mobilisation and immobilisation mechanisms are therefore:

- *Thorough studies of the speciation of target element and compounds require detailed knowledge on the hydrochemical factors. Thus, dynamics in the proton concentration as well as the concentration of redox active compounds have to be known.*
- *The mobilisation and immobilisation of metals and organic compounds by the carrier function of humic substances and other colloids. The formation and disintegration of colloids and the presence of more stable particles and aggregates and their velocity in the groundwater flow should be investigated. This is important because of the sorption interaction between these structures and particles with elements, organic and inorganic compounds. The compounds may be subjected to enhanced transport velocities by being sorbed in this manner. Substances with low water solubility may be sorbed or bound to humic substances or other colloids.*
- *Humic materials may accelerate the transport rate of the contaminant. The role of moderate or high organic matter content in groundwater should be studied in order to quantify carryover of secondary contaminants.*

6.2.4.2 Biotransformação

Organic compounds mainly of anthropogenic origin make up a wide spectrum of pollutants identified in soil and groundwater. They belong to almost all varieties of substituted and unsubstituted aliphatic and aromatic compounds. Biotransformation of such compounds, either intrisic or facilitated, is one way of preventing the polluting compounds from reaching target organisms which would react on their toxicity or resulting in water not accepted for

use for drinking or irrigation. Thus, efforts are taken to study and utilise biotransformation in order to remediate soils and groundwaters. There are several cases reported, where successful biotransformation of polluted areas have occurred. A challenge is to study and decide if a polluted area should be left for natural attenuation or if it should be subjected to more active remediation measures. The primary source of pollution should always be tracked and eliminated if possible.

The chemical structure of an organic pollutant giving its physical properties will form the background for its aptitude to be degraded.

Organic pollutants of anthropogenic origin i.e. new compounds synthesised by man as well as petroleum products of different refinery grades are in analogy with their naturally formed cousins dependent on a row of parameters among which are:

- *Ability to function as a substrate i.e. as carbon and/or energy source or as electron acceptor.*
- *Suitability for co-metabolic transformation.*
- *Toxicity to microorganisms.*
- *Solubility in water – concentration levels.*
- *Sorbtion features.*

Upon these compound specific properties microorganisms able to transform the compound will need nutrients and electron donors or acceptors and a suitable physical-chemical environment e.g. appropriate pH and redox conditions. A combination of the above features will govern the fate of a certain compound or group of compounds in relation to biotransformation. This means that the kinetics and thus the degree of persistence of a compound will be determined by these properties. In order to assess the extent of biotransformation of a compound or a mixture of compounds polluting a groundwater basin a row of parameters have to be studied:

- *Mobility and transport as mediated by different phases, i.e. dissolved in water and/or attached to different colloids and particles.*
- *This means that a handle on the hydrology dynamics is necessary. This would likely mean that a thorough modelling of the hydrological regime over time and space at different scales is needed to arrive at the transport velocities for a compound in a particular aquifer.*
- *Appropriate analytical chemical tools to follow the extent of transformation and distribution in the basin area are needed. The occurrence of intermediates released into the environment also calls for such tools. Due to different matrix characteristics, demands for modification or development of methods may be raised, which may also be the case for possible intermediates.*
- ***The availability of nutrients, electron donors and/or acceptors, i.e. the input and/or replenishment of these components (via chemical or (micro) biological routes) should be addressed in order to understand the dynamics of transformation rates and patterns. This will strongly link to the chemical transformations and physical conditions set by the matrix medium.***

Thus, weathering rates and exchange of redox active compounds with each other may pose

constraints on the biotransformation rates.

- *Organic compounds and metals may become fixed in the matrix, which renders them inaccessible to further transformation reaction or mineralisation. Such fixation is not necessarily stable. Conditions affecting its reversibility need to be studied.*

- *Basic knowledge of the underlying microbiology is essential in order to interpret the patterns observed in the field and in supporting laboratory studies. Therefore, the regulation of the physiology of single microorganisms and the interaction among them are important to study.*

Investigations along the lines above may call for studies at different scales i.e. in time and space as well as in the form of different levels of complexity of the system. Thus, field, macro- and microcosm and stratified laboratory studies. The interpretation and integration of reinforced studies into the field reality is a challenge, which should be addressed by modelling efforts. Interdisciplinary strategies should be included in the protocols for this type of research.

6.2.4.3 Uma Abordagem Interdisciplinar

The complexity of natural systems requires interdisciplinary research as well as a combination of different scales of investigations. If parameters obtained from simplified systems like e.g. batch experiments do not match field observations, they should not be used to generate models. The complexity of the field situation should be scaled down to experimental set-ups in order to define parameters matching the system dominating processes. The field investigations as well as the experiments have to be designed in close co-operation of different scientific groups as e.g. geologists, geochemists, biologists and modellers. This target can be achieved by an appropriate funding of interdisciplinary research activities:

- ***Vulnerability of aquifers** to disturbance of steady state conditions in the biogeochemical balance.*

- *Changes in the input-output situation as e.g. variation in the water table may instabilise the geochemical steady state conditions and lead to severe damages, for instance pyrite oxidation. This is reflected in changes in pH and/or pE, leading to changes in the ion content as well as the mobility of pollutants. The factors determining the vulnerability of the system towards such disturbances, e.g. reduction-oxidation capacity or the buffer capacity, are poorly understood and are in need of research effort.*

- *Effects of changing land use on groundwater quality.*

- *Harvesting boreal forests by clear cutting often damages groundwater quality e.g. by increasing the groundwater contents of aluminium and other undesirable ions and also organic substances.*

Similar problems are linked to other changes of land use. The processes linking the biogeochemical groundwater system with deposition, hydrological regime and the living ecosystem are not sufficiently known to give the scientific community tools for predicting or avoiding groundwater damage.

6.2.5 Grupo de Trabalho 3

This working group rapidly concluded that the three aims to be discussed, impact on organims and ecosystems, remedial measures and prevention, only could be addressed with appropriate basic knowledge about subsurface processes. The report of this group, therefore, came to constitute the frame within which the research priorities of Working Groups 1 and 2 fit very well.

The basic approach taken was to consider processes in a small-scale representative cell (scaled down box) taken from the subsurface system. This approach allows us to consider a multitude of cases ranging from heavily polluted point sources to processes related to diffuse pollution and covering both well understood reaction mechanisms and descriptive rate measurements. The processes in this small grey box are governed by the input parameters water and polluting chemicals, the characteristics of the abiotic matrix, and the microbial activity. We have particularly considered the biological agents in this small scale box, and in addition to the development of molecular diagnostics to determine the nature of the dominant organisms, feel the need for an appropriate physiological characterization of the microbiological potential relevant to the prevailing micro-environmental status. In particular attention should be paid to the generally low temperature of the subsurface environment, the often oligotrophic nature of the organisms involved, and the distribution of pollutants between the aqueous and solid phases in the system. The small scale boxes may be considered as suitable experimental systems that can provide relevant information at the laboratory scale. They may take the shape of aquifer microcosms e.g. sediment columns.

If sufficient information of representative cells of the subsurface system has been generated, the next challenge is to upscale the processes in both time and space. The quality of upscaling is strongly dependent on the understanding of the small-scale processes and the scale-dependent heterogeneity of the system. We strongly recommend to build and manage, similar to the existing PANGAEA database in the marine sciences, a European Gpoll database which should contain information about the geological, geophysical, hydrological and biogeochemical properties of the subsurface, about the behaviour and toxicity of pollutants, about ongoing research and available results.

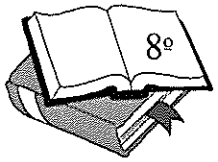
The present conference convincingly demonstrated to the participants the usefulness of interactions between scientists from different disciplines in addressing complex environmental problems. A similar interdisciplinary research effort is required to improve the existing knowledge base.

Priority list of research needs with respect to subsurface processes:

1. *Encourage inter- and multidisciplinary collaboration in hydrobiogeochemistry through workshops and fellowships.*
2. *Development and use of suitable laboratory systems (small scale boxes) to study processes under relevant boundary conditions.*
3. *Development and use of molecular diagnostic techniques for the characterization of the biological agents.*
4. *Studies of the biological potential, natural attenuation, under field conditions.*

5. *Build and manage a European Gpoll database containing pertinent physical, chemical and biological data.*

CAPÍTULO OITAVO



AFIRMAÇÃO DO PAPEL INTERNACIONAL DA INVESTIGAÇÃO COMUNITÁRIA NO DOMÍNIO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Resumo do Capítulo

Este Capítulo Oitavo foi dividido em duas partes. Na Parte I desenvolve-se o tema da afirmação do papel internacional da investigação comunitária no domínio das águas subterrâneas, destacando-se as prioridades definidas pelo Conselho de União Europeia para o Quinto Programa-Quadro, pela sua Decisão de 14 de Dezembro de 1998.

Na Parte II do capítulo apresentam-se discussões, conclusões e recomendações para acções comunitárias de projectos de investigação ou de acções concertadas de investigação. Destacam-se as acções que contaram com a colaboração do autor sobre o tema **internacionalização**, que permitem **focar a nível mundial**, as linhas de investigação mais carênciadas no domínio dos recursos hídricos subterrâneos.

Pretende-se assim contribuir para um melhor conhecimento nacional sobre o tema da internacionalização, além União Europeia, visando o reforço das actividades nacionais de investigação em recursos hídricos subterrâneos, aplicados ao contexto actual de **globalização e afirmação do papel internacional da investigação comunitária**.

AFIRMAÇÃO DO PAPEL INTERNACIONAL DA INVESTIGAÇÃO COMUNITÁRIA NO DOMÍNIO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

PARTE I : GRANDES LINHAS, OBJECTIVOS CIENTÍFICOS E TECNOLÓGICOS E PRIORIDADES DO PROGRAMA ESPECÍFICO DE AFIRMAÇÃO DO PAPEL INTERNACIONAL DA INVESTIGAÇÃO COMUNITÁRIA

(1998-2002)

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

O Concelho da União Europeia, pela sua Decisão de 14 de Dezembro de 1998, publicada no Jornal Oficial das Comunidades Europeias (JO) L 7, de 13 de Janeiro de 1999, adoptou um Programa-Quadro de acções da Comunidade Europeia em matéria de investigação, de desenvolvimento tecnológico e de demonstração para o período 1998-2002. São os seguintes os principais objectivos do tema horizontal de **afirmação do papel internacional da investigação comunitária**:

- incentivar a cooperação científica e tecnológica a nível internacional; reforçar as capacidades da Comunidade nos domínios da ciência e da tecnologia; apoiar em geral a excelência científica no âmbito internacional alargado e contribuir para a implementação da política externa da Comunidade, sem esquecer a adesão de novos Estados.

1.2 Objectivos do Quinto Programa-Quadro quanto a Cooperação Científica e Tecnológica a Nível Internacional

São os seguintes os objectivos do Quinto Programa-Quadro quanto a cooperação científica e tecnológica a nível internacional:

- Promover a cooperação científica e tecnológica entre empresas, organismos e investigadores de países terceiros e da Comunidade, de modo a obter benefícios substanciais, mútuos e equilibrados, tendo em conta as diferentes necessidades e condições dos vários grupos de países e regiões e respeitando, ao mesmo tempo, a protecção da propriedade intelectual;

- Facilitar o acesso dos centros de investigação e empresas estabelecidos na Comunidade aos conhecimentos científicos e tecnológicos disponíveis no exterior da Comunidade e que a esta possam ser úteis;

- Reforçar a posição e o papel da investigação comunitária no panorama científico e tecnológico internacional e promover uma cultura científica e tecnológica europeia, tendo em conta as necessidades sociais e culturais dos países com os quais a Comunidade coopera;

- Preparar a adesão de novos Estados-Membros, nomeadamente encorajando a sua associação plena ao Programa-Quadro; contribuir para a estabilização do potencial de IDT dos países da Europa Central e Oriental em geral e dos Novos Estados Independentes da ex-União Soviética (NEI); apoiar e desenvolver a **parceria euro-Mediterrânica** e **contribuir para o desenvolvimento económico, social e científico sustentável dos países em desenvolvimento**,

- Apoiar os agentes europeus da investigação na obtenção de informações e de experiência sobre as capacidades, actividades e prioridades, em matéria de investigação, dos países terceiros industrializados e dos países de economia emergente, a fim de reforçar a competitividade da indústria comunitária e a sua presença nos novos mercados.

No âmbito do **Quinto Programa-Quadro**, a cooperação internacional no domínio da IDT será concretizada sob duas formas: em primeiro lugar, através do presente programa específico e, em segundo, através dos outros programas específicos, e em estreita coordenação

com eles.

São as seguintes as acções específicas previstas no presente programa:

- Execução de actividades de carácter estratégico tendo em vista os países candidatos à adesão, outros Países da Europa Central e Oriental (PECO), os Novos Estados Independentes da ex-União Soviética (NEI) (com exclusão dos Países Bálticos) e a Mongólia, os países parceiros mediterrânicos e os países em desenvolvimento. Para explorar plenamente as possibilidades de cooperação e optimizar o valor acrescentado a nível europeu, o presente programa deverá igualmente facilitar a cooperação com certos países industrializados e de economia emergente;
- Aumentar as oportunidades de formação de investigadores;
- Assegurar a coordenação com outros programas específicos do Programa-Quadro, outras iniciativas e políticas da Comunidade, designadamente as políticas externas, e políticas e programas dos Estados-Membros, de organizações e estruturas internacionais de cooperação como o COST e o EUREKA.

A segunda forma de cooperação internacional consiste na participação de parceiros exteriores à União (não financiada pelo presente programa específico) nos projectos dos outros programas, de acordo com as regras de participação e difusão.

2. ACTIVIDADES ESPECÍFICAS DO QUINTO PROGRAMA-QUADRO

2.1 Considerações Gerais

O presente programa só financiará as actividades específicas de IDT pertinentes para determinados países terceiros ou regiões que não estiverem abrangidas pelas outras partes do Programa-Quadro. As prioridades da investigação serão definidas com base num diálogo e numa cooperação reforçados com as regiões abrangidas, tendo em conta os acordos de cooperação existentes e a diversidade das respectivas situações e necessidades económicas e socioculturais. O apoio deve centrar-se na cooperação em matéria de investigação e desenvolvimento tecnológico, e não na assistência técnica ou na transferência de tecnologias, que são objectivos mais fáceis de atingir no quadro dos programas comunitários de relações

externas. Na aplicação deste programa serão tomados em consideração os interesses da indústria e, particularmente, das pequenas e médias empresas.

2.2 Cooperação com Países Terceiros em Vias de Desenvolvimento ou com Economias Emergentes

2.2.1 Países Parceiros Mediterrânicos

2.2.1.1 Justificação e Objectivos

Além da sua participação nos outros programas específicos e na acção específica de Investigação para o desenvolvimento do presente programa, serão realizadas algumas acções específicas com os parceiros mediterrânicos a fim de reforçar a dimensão científica e tecnológica da Parceria Euro-Mediterrânica, se necessário através do melhoramento das capacidades de investigação e desenvolvimento tecnológico desses países e da promoção da inovação.

2.2.1.2 Actividades

Sem prejuízo das possibilidades de cooperação com outros programas específicos e em função dos resultados do diálogo permanente com estes países (nomeadamente no contexto do "processo de Barcelona"), serão desenvolvidas actividades específicas relativas aos aspectos regionais, em especial nos seguintes domínios: **gestão integrada da zona costeira** do Mediterrâneo (incluindo os aspectos ambientais); **gestão da água** (incluindo as interacções água-energia); gestão dos recursos naturais no contexto do desenvolvimento sustentável do turismo; conservação e restauro do património cultural; desenvolvimento, nesse contexto, da modernização sócio-económica (incluindo a inovação, a dimensão urbana, a saúde, os transportes e o apoio ao estabelecimento de uma sociedade da informação Euro - Mediterrânica).

2.2.2 Investigação para o Desenvolvimento

2.2.2.1 Justificação e Objectivos

Esta parte do programa tem por objectivo abordar, conjuntamente com os cientistas dos países em desenvolvimento, os problemas de investigação directamente relacionados com os desafios do desenvolvimento, numa perspectiva de interesse mútuo e de longo prazo. Os assuntos a tratar serão escolhidos com base no diálogo e na cooperação com os grupos de países e regiões sobre as suas necessidades em matéria de IDT, prioridades e exigências socio-económicas específicas, tendo igualmente em conta os objectivos de política económica da Comunidade e os objectivos de desenvolvimento acordados a nível internacional, bem como a experiência adquirida com o Quarto Programa-Quadro.

2.2.2.2 Actividades

Entre outras, serão realizadas actividades específicas nos seguintes domínios:

- Mecanismos e condições sócio-económicas e políticas que permitam um desenvolvimento sustentável:
  - Análise dos factores que possibilitam a adopção das inovações existentes. Em complemento dos principais domínios a seguir mencionados, serão abrangidos os domínios sectoriais e intersectoriais tais como a sociedade global da informação, a energia, os transportes, a população, as questões relacionadas com o género e a urbanização.
- Gestão e utilização sustentáveis dos recursos naturais:
  - Promoção de uma relação sustentável entre a pressão demográfica, a segurança alimentar e a utilização e a gestão dos ecossistemas; melhoramento da produtividade e da prevenção da degradação dos recursos naturais renováveis.
  - Análise da evolução da procura de produtos agrícolas nesses países e investigação sobre as formas de satisfazer essa procura; melhoria da eficácia das cadeias de produção agrícola, com especial atenção para os aspectos qualitativos e sanitários.

2.2.3 Países de Economia Emergente e Países Industrializados

2.2.3.1 Justificação e Objectivos

Estes países são simultaneamente concorrentes e parceiros da União no mercado mundial. A presente parte do programa incentivará:

- O diálogo político bilateral e multilateral (e.g. G-7, OCDE) no âmbito da investigação, a fim de facilitar e acompanhar a cooperação, bem como identificar as prioridades de interesse mútuo;
- O acesso ao *saber-fazer* e às oportunidades existentes nestes países no âmbito da investigação, contribuindo assim para a melhoria do desempenho da investigação europeia e para a competitividade da União no contexto da economia mundial;
- A repartição dos custos e benefícios das acções de âmbito mundial;
- A cooperação tendo em vista solucionar problemas mundiais (por exemplo as alterações climáticas globais).

2.2.3.2 Actividades

Para facilitar e melhorar o acesso ao potencial de investigação existente no exterior da União, em benefício das **acções-chave** e das actividades genéricas dos programas específicos, o presente programa desenvolverá acordos de cooperação cientifica e tecnológica em certos domínios com alguns países industrializados não membros da União Europeia. Este instrumento poderá ainda ser alargado à cooperação em determinadas áreas com alguns dos principais países de economia emergente, ou seja, certos países em desenvolvimento que constituem mercados importantes e que já atingiram o nível dos países industrializados em domínios científicos e tecnológicos específicos.

2.3 Formação dos Investigadores

Será criado um sistema de bolsas a fim de permitir que um número limitado de jovens investigadores com um nível equivalente ao do doutoramento oriundos de países em desenvolvimento, incluindo os países mediterrânicos e os países de economia emergente, trabalhem em laboratórios europeus no contexto dos projectos do **Quinto**

Programa-Quadro. Tal contribuirá para reforçar as potencialidades científicas nestes países, permitindo simultaneamente que a investigação comunitária beneficie das suas competências.

Além disso, um segundo sistema de bolsas permitirá a um número limitado de jovens investigadores comunitários trabalhar em domínios que apresentem um interesse específico para a Comunidade, em laboratórios do mais alto nível orientados para a indústria, e situados em países terceiros. Estes sistemas de bolsas tomarão em linha de conta a política de igualdade de oportunidades da Comunidade.

2.4 Coordenação

2.4.1 Coordenação das Actividades do Programa-Quadro entre si e com as Actividades dos Outros Programas Comunitários

Para definir e aplicar uma política de cooperação internacional no domínio da investigação, o presente programa terá em conta as políticas, instrumentos, iniciativas, interesses e capacidades de outros intervenientes neste sector. Um dos objectivos centrais será, pois, o de garantir a coordenação com os restantes programas específicos e com outras políticas e instrumentos comunitários.

A coordenação com os outros programas específicos centrar-se-á na procura de coerência no que respeita à participação dos parceiros exteriores à União, no acompanhamento e análise (em termos de utilidade e benefício mútuos) da participação de entidades exteriores à União ou de organizações internacionais e ainda na análise das tendências de participação por país e por programa.

Além disso, sempre que existirem oportunidades de cooperação internacional de interesse mútuo no domínio da investigação, o presente programa apoiará os outros programas no estabelecimento de uma cooperação eficaz, inclusivamente através da organização de manifestações destinadas a informar sobre as regras e políticas aplicáveis às actividades de IDT comunitárias em geral e sobre a participação de entidades de países terceiros e de organizações internacionais em particular:

- A coordenação com os programas comunitários de assistência técnica externa por exemplo PRARE TACIS, MEDA, FED e os programas para a Ásia e a América Latina aumentará a sinergia entre as respectivas acções e o trabalho realizado no âmbito da política de

investigação. Tais programas poderão, assim proporcionar um apoio eficaz ao sector cientifico e tecnológico nos países abrangidos.

Coordenação com o COST, EUREKA e organizações internacionais:

- **COST:** O programa COST, que se estende muito para além da União, constitui um instrumento útil para promover a cooperação e incentivar a coordenação mútua das actividades nacionais e internacionais em vasta escala, tanto no plano temático como geográfico, bem como para estimular a participação dos investigadores oriundos de países em fase de pré-adesão nas actividades pan-europeias. A sua flexibilidade continuará a ser aproveitada para intensificar a exploração de novas ideias e de novos domínios científicos e tecnológicos. Os métodos de associação entre as actividades COST e as actividades do Programa-Quadro serão melhorados, tendo em vista tirar maior proveito da potencial sinergia entre os dois instrumentos, em especial no que respeita à realização das acções-chave e das actividades genéricas do Programa-Quadro. O programa dará apoio técnico e financeiro à administração do COST.

- **EUREKA:** As actividades EUREKA e as actividades relacionadas com o Programa-Quadro são complementares. O objectivo é maximizar, em torno de um número limitado de temas prioritários de interesse comum a utilização coordenada dos dois instrumentos. Serão desenvolvidos métodos simples e eficientes para estabelecer ligações entre o Quinto Programa-Quadro e o EUREKA, a aplicar, em primeiro lugar, a projectos estratégicos incluídos no âmbito das acções-chave dos programas temáticos, em conformidade com os critérios de selecção e procedimentos do Programa-Quadro. Os mecanismos de informação e coordenação serão melhorados a fim de incentivar um desenvolvimento positivo desses projectos, preservando simultaneamente os papéis distintos do EUREKA e do Programa-Quadro, assim como as suas especificidades e meios financeiros.

- **ORGANIZAÇÕES INTERNACIONAIS:** Uma cooperação mais estreita entre a Comunidade e as organizações internacionais envolvidas na investigação e na definição de políticas cientificas e tecnológicas, bem como a participação destas organizações nas actividades do Quinto Programa-Quadro, reforçará a coerência global da investigação na Europa e permitirá optimizar a utilização e exploração das infra-estruturas científicas europeias. A Comissão intensificará, sempre que adequado, a sua participação nas

actividades dessas organizações, incentivando, nomeadamente, a coordenação entre e com os Estados-Membros.

2.4.2 Coordenação com os Estados-Membros

As actividades da Comunidade e dos Estados-Membros no domínio da cooperação internacional em matéria de investigação têm frequentemente por objecto questões idênticas ou conexas. Sem prejuízo da observância do princípio da subsidiariedade, é não só possível mas também **necessário reforçar a coordenação** em certos domínios o que permitiria elevar os esforços individuais acima da massa crítica e melhorar a eficácia, a flexibilidade e a visibilidade globais **das actividades da Comunidade e dos Estados-Membros**. Baseando-se na experiência adquirida no quadro de iniciativas como a "Iniciativa Europeia de Investigação Agrícola para o Desenvolvimento", o presente programa identificará os domínios da investigação pública e industrial que se prestam a novas acções coordenadas, dando início a actividades de coordenação adequadas.

PARTE II: APRESENTAÇÃO DE DISCUSSÕES, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA PROJECTOS DE INVESTIGAÇÃO OU DE ACÇÕES CONCERTADAS DE INVESTIGAÇÃO A NÍVEL GLOBAL

3. INCO-DEVELOPMENT: COOPERAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA COM A ÁSIA NA ÁREA DA GESTÃO SUSTENTÁVEL DOS RECURSOS NATURAIS

3.1 Introdução

Teve lugar em Pequim, R.P. China, de 24 a 27 de Novembro de 1998, uma Reunião de Coordenação de vinte e seis ***Contratos de Investigação*** e ***Acções Concertadas*** de **Cooperação Científica e Tecnológica com a Ásia**, seleccionados pela DGXII - Programa INCO-DC.

A Comissão Organizadora da Reunião de Coordenação foi formada por dois elementos da Comissão Europeia, o Prof. Tilak Viegas (*DGXII-INCO-DC Programme co-ordination*) e o Dr. Lorenzo Vallés (*EC Science Counsellor EU-Beijing, P.R. China Delegation)*, **pelo autor *(representante científico europeu seleccionado pela DGXII)*** e por dois cientistas Chineses, o Dr. Hu Mu (*Department for International Co-operation of the State Science and Technology Commission of P.R. China*) e o Prof. Jinren Ni (*Prof. na Universidade de Beijing*).

Os instrumentos comunitários de apoio e financiamento considerados nesta Reunião de Coordenação foram o Terceiro Programa-Quadro (Science and Technological Development - STD3) e o Quarto Programa-Quadro (International Co-operation with Developing Countries, INCO-DC). Do último, foram incluídos contratos resultantes das 1ª, 2ª, 3ª e 4ª Chamadas para a Apresentação de Propostas. Em todos os 26 Projectos de Investigação e Acções Concertadas seleccionados, houve (nos projectos iniciados em 1992 e já concluídos), há (nos projectos em curso) ou haverá (nos projectos iniciados em finais de 1998) uma forte participação de cientistas da Ásia. A R.P. China está representada em mais de metade dos projectos seleccionados.

As cinco áreas temáticas seleccionadas para a Reunião de Coordenação têm, em todos os casos, relevância fundamental para o **desenvolvimento sustentável** do Sul, Sudeste e Leste da Ásia, estando em acordo com os objectivos da AGENDA-21 da R.P. China. Os grupos temáticos (***thematic clusters***) seleccionados foram os seguintes:

- T1: **Conservação do solo e dos recursos hídricos** em áreas agrícolas naturais, com ou sem regadio, e políticas para aumento da eficiência da sua utilização (*conservation of soil and water resources in irrigated and rainfed agricultural areas and policies to increase the efficiency in their use*);

- T2: **Gestão sustentável de recursos hídricos** superficiais e **subterrâneos** e tecnologias para melhorar a sua qualidade; (*sustainable management of surface and* ***groundwater resources*** *and technologies to improve its quality*);

- T3: Gestão de ecossistemas naturais e agrários e investigação sobre indicadores apropriados (*natural and agro-ecosystem management and the search for suitable indicators*);

- T4: Eco-compatibilidade de processos industriais e de estratégias de gestão ambiental em áreas sujeitas a acelerada expansão urbana, incluindo a gestão de resíduos sólidos (*eco-*

compatibility of industrial processes and environmental management strategies for areas undergoing accelerated urban expansion, including waste management);

- T5: Zonas costeiras, zonas húmidas e gestão de bacias hidrográficas: Métodos, ferramentas e tecnologias (*coastal zone, wetland and watershed management approaches, tools and technologies).*

De cada um dos 26 contratos foram seleccionados, no mínimo, um representante europeu (na maioria dos casos o coordenador científico) e um representante asiático. A Reunião incluiu participantes Chineses potencialmente interessados nos resultados da investigação, nas metodologias ou nas abordagens científicas (e.g. cientistas, técnicos de agências ambientais, autoridades regionais) foram convidados pela DGXII ou pelo Ministério Chinês da Ciência e Tecnologia, e ainda contratados asiáticos associados a outros projectos com ênfase especial em gestão de ecossistemas e de recursos naturais, em áreas urbanas e em áreas rurais. Parceiros europeus, em estreito contacto com as actividades suportadas pela DG I no sector ambiental (e.g. companhias) foram também convidados, para o enriquecimento da análise e do debate.

3.2 Conclusões

3.2.1 Conclusões Gerais

Visando dar a conhecer as principais conclusões e as linhas de investigação sugeridas pelo "**S&T Co-Operation with Asia in the Area of Sustainable Management of Natural Resources**", apresenta-se nesta secção um extracto do *Executive Summary* elaborado por LOBO-FERREIRA e TILAK VIEGAS (1999):

The Co-ordination Meeting was jointly organised by Dr.-Ing. JP Lobo-Ferreira, an European scientist, by Dr. Lorenzo Vallés, EC Science Counsellor EU-Beijing, P.R. China, Delegation, by Dr. Hu Mu, Department for International Co-operation of the State Science and Technology Commission of P.R. China, by Prof. Jinren Ni, a Chinese scientist, with the co-operation and support of Prof. Tilak Viegas, DGXII-INCO-DC Programme co-ordination. The Commission and the SSTC of P.R. China jointly supported financially the Meeting.

The Co-ordination Meeting constituted an excellent opportunity to take stock and discuss past achievements, interact and obtain feedback from users of research results (e.g. companies, environmental agencies and municipal authorities), and look into future research or service development needs. The forthcoming FP5, associated eventually with the signature of an S&T Agreement with China, will create additional opportunities for co-operation, giving continuity

to INCO-DC and opening up several of the new key actions of Activity 1 to Chinese participation. In this context it was considered important and it was possible during the Meeting to visualise the main problem areas faced by China in its efforts to promote sustainable development, bearing in mind the opportunities created by fast economic growth as well as the country's increasing market orientation.

Hereinafter we present the summary of discussions and conclusions drawn during the Meeting, as reported by each one of the five Thematic Clusters Rapporteurs.

3.2.2 Síntese do Relatório do Thematic Cluster T2: Sustainable management of surface and groundwater resources and technologies to improve its quality

Summary of discussion related to Cluster T2, by Prof. E. Feoli (I), Prof. S. Cescotto (B) and Prof. Jiti Zhou (CN)

1. *Quality of data and reliability. It was concluded that the problem is very general and that it has to be solved in accordance with the scale of the model and the variability of the data collected in nature. It is recommended that EC would promote meetings for comparison between different methods of collecting and storing data. An important issue is also the availability-accessibility of data. It was stressed that data and models have always to be validate at appropriate scales keeping into consideration the relevance of the accuracy or precision in the context of the problem. Validation of models means also validation of data.*
2. *It was stressed the importance of integrating research in different disciplines when dealing with sustainable development projects, this may be facilitated by networking. Networking Activities should be the basis for developing suitable partnerships.*
3. *It was recognised the importance of scaling in the projects of sustainable development. Different scales exist because local, national, regional, etc. levels may be involved in the projects. At the local level participatory approach (by integrating local people, administrators, decision-makers, etc.), is recognised as a very important issue. The concept of carrying capacity of natural resources at different hierarchical levels should be also considered when planning the socio-economic development of a given area.*
4. *Knowledge has to be communicated between the different levels of research and the possible users. It is recognised that feed-backs from users to scientists may improve the understanding of the interdisciplinary problem and to improve the capacity of the scientists to understand the problem and to formulate better interdisciplinary projects and carry out interdisciplinary research related for sustainable development.*
5. *In the practical use of the models it should be find innovative ways to transfer knowledge to practice at different user levels, may be by promoting diffusion programs, demonstration projects especially at pre-competitive stage.*

3.2.3 Resumo das Conclusões Apresentadas pelo Prof. Tilak Viegas (DGXII-INCO-DC Programme Co-ordination)

3.2.3.1 Temas Científicos

- ***The importance of scale**: Methodology should be developed to design projects capable of integrating different scales of research from the microcosmic biophysical environment of ecosystems to the macrocosmic environment of the decision domain. This is essential to amplify the results of the research and extend them to different scales.*
- ***Data quality and information management**: Methods and models have to be compared beyond any restriction, metadata systems have to be created in order to put the scientists in the condition to share the data collected at microcosmic level.*
- ***Integration of biophysical data and human dimension** to understand the global ecosystems dynamics and the transfer of energy and material to different compartments of the biosphere.*

3.2.3.2 Temas Operacionais

- ***Logistic**: The INCO projects have given an enormous opportunity to enlarge the possibility of contacts between scientists of EU and DC. The opportunity to share data and experience may reduce the costs of the projects and may enhance the possibility of dissemination.*
- ***Applicability and sustainability of the projects**: DGXII is not in the condition to promote Demonstration projects, however the sustainability and applicability of the results of the project should be promoted by the participatory approach and by dissemination programs.*
- ***Human capital**: has to be improved by networking and exchanges of information and by partnerships. Synergetic actions between different donors have to be activated during the projects. PhD programs have to be suitably included or harmonised with financed projects.*

4. ASEM: CONTRIBUIÇÃO PORTUGUESA PARA O WORKING PAPER ON WATER ISSUES - A FOLLOW-UP OF THE FIRST PREPARATORY MEETING FOR ASEM SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL MINISTERS, HELD IN BEIJING, P. R. CHINA

4.1 Considerações Gerais

A Primeira Reunião Preparatória da Reunião Ministerial de Ciência e Tecnologia dos países asiáticos e europeus da ASEM, realizou-se em Pequim, R.P. China, em 25 e 26 de Novembro de 1998. Portugal esteve representado pelo Presidente do Instituto para a Cooperação Científica e Tecnológica Internacional (ICCTI), Eng. A. Trigo de Abreu. Na sequência dessa Reunião Preparatória, visando programar futuras acções de cooperação ASEM, o Presidente do ICCTI convidou **o autor**, o Prof. L. Santos Pereira, do Instituto Superior de Agronomia da Universidade de Lisboa, e a Engª Margarida Cardoso da Silva, do LNEC, a elaborarem a "**Contribuição Portuguesa para a Comunicação sobre a Temática da Água**".

4.2 Os Desafios

Visando dar a conhecer as principais conclusões e a linhas de investigação sugeridas pelo "**A Follow-Up of the First Preparatory Meeting for ASEM Scientific and Technological Ministers, held In Beijing, P. R. China, Nov. 25-26, 1998**", apresenta-se nesta secção um extracto do **Draft Portuguese Contribution for the Working Paper on Water Issues** elaborado por LOBO-FERREIRA *et al.* (1999):

The ASEM Asian countries are among the most populated in the world with relatively high rates of growth in many of them. This puts a high pressure on the use of the natural resources, water in particular. They are in general rich in water resources but the increased demand and the degradation of water quality place the water issues among the priorities for most of these countries.

The monsoon regime of rainfall made agricultural water use fundamental. The ASEM countries are responsible for near half of the irrigated areas in the world, mainly for rice production. The rice yields attainable in these countries definitely would not be possible without irrigation. The monsoon rains are also responsible for very high intensity rainfall causing high runoff and, often, extreme flood events. High and intense runoff goes along with erosion and sedimentation problems and make more difficult the maintenance and management of hydraulic systems.

The population growth and the notable increase in industrialisation have caused a strong shift of population from rural to urban areas. The urban areas have grown enormously during the last decades, putting an enormous pressure on the low lands and particularly on the coastal regions. Not only the respective ecosystems have been often destroyed or damaged, but populations became more vulnerable to the impacts of flood events and of the poor quality of the water bodies. Tourist activities also have grown drastically and, definitely contribute to the pressure on many vulnerable ecosystems adding to the urban and industrial development consequences.

***Coastal zones** are known to be of a high ecological, social and economic value. As an interface between land and sea, the coastal zone is by definition a unique and fragile resource with a crucial role in the maintenance of a natural equilibrium based on sea-land exchanges. It has also a strategic role in the support of social and economic activities. In addition, the coastal zone has an irreplaceable function in the recreation and leisure of people living outside the area. In the coastal zone, estuaries are particular systems that are prone to increasing pressures from man activities and that represent an extreme case of both ecological importance and place of use conflicts.*

In recent years, the world population moved towards the littoral, in such a way that now it is estimated that about three quarters lives in the coastal zone. Many of the most developing areas of the world are settled in the mouth of big rivers and this is particularly true in Asia. This increasing population pressure, together with the unique characteristics of the area and its unusually high diversity of natural resources creates a potential for an also great diversity of activities, associated with a corresponding great potential for conflicts and a need for harmonisation of these activities. In countries of Asia, this is of particular importance due to the uniqueness of the coastal ecosystems and the growing demand of the coastal use as resorts for an increasing and diverse population from the area as well as from all over the world.

*The urgency to create mechanisms, which **search for the harmonisation between the need for economic development on the one side and the need to preserve the natural values and resources of the coastal zone on the other**, is generally recognised. These mechanisms should constitute a **Coastal Zone Management System**, integrating economic and environmental considerations on the basis of the concept of ecologically sustainable development.*

A basic concept applied to the Management of Coastal Zones may be stated as "the sustainable utilisation for the benefit of mankind in a way compatible with the maintenance of the natural properties of the ecosystem". In this respect, sustainable utilisation means the "human use of the coastal zone so that it may yield the greatest continuous benefit to present generations while maintaining its potential to meet the needs and aspirations of future generations". It has to be stressed that natural properties and potentials not only mean potential yield in economic terms, but also species diversity, scenic beauty and scientific and recreational value.

According to OECD, integrated coastal zone management is "the management of the coastal zone as a whole, in relation to local, regional and (inter)national goals". It implies a particular focus on interactions between various activities and resource demands. It also implies the integration of environmental protection goals into economic and technical decisions. And, last but not least, successful management includes an "integration over time" with short-term day-to-day management objectives being co-ordinated with long-term policy goals.

4.3 Tipos de Investigação, Ligações Inter-Sectoriais e Mecanismos

O Quinto Programa-Quadro, associado eventualmente com a assinatura de um Protocolo Cientifico-Tecnológico com a R.P. China, criará oportunidades adicionais de cooperação, dando continuidade a acções ASEM.

4.3.1 Os Desafios Propostos pelo Portuguese Contribution Paper

- *Conservation of soil and water resources in irrigated and rainfed agricultural areas and policies to increase the efficiency in their use;*
- *Sustainable management of surface and groundwater resources and technologies to improve its quality;*
- *Eco-compatibility of industrial processes and environmental management strategies for areas undergoing accelerated urban expansion, including waste management;*
- *Sustainable management of coastal zones, wetland and watershed management approaches, tools and technologies.*

4.3.2 Temas Propostos pelo Portuguese Contribution Paper para Projectos ASEM

- *ASEAM project's methodology should be extended to socio-economic policy aspects. In particular, the consequences of agricultural policies and higher water prices for the adoption of improved methods should be examined.*
- ***ASEAM project's methodology should be extended to the research on pollutant transport by underground water.***
- *Collaboration between these issues would enable a profound analysis of the issue of water quality.*

4.3.3 Prioridades Recomendadas pelo Portuguese Contribution Paper para Cooperação ASEM

- ***Integrated Water Resources Planning***
- ***Water Quality Management***
- ***Preservation and Rehabilitation of Groundwater Quality***
- ***State of the Environment and Decision Support Indicators***
- ***Planning and Management of Water Resources Systems***

- *Optimised Management of Aquifers*
- *Preservation and Rehabilitation of Groundwater Quality*
- *Renewable Groundwater Resources: Evaluation and Calibration of Groundwater Recharge*
- *Research Needs and Monitoring for the Sustainable Management of Coastal Zones*

No Capítulo Nono apresenta-se uma *Acção Concertada* onde se desenvolvem as prioridades acabadas de referir.

5. LINHAS DE COOPERAÇÃO COMUNITÁRIA INTERNACIONAL COM O SUL DE ÁFRICA

5.1 Considerações Gerais

Visando realçar as linhas de força pretendidas pelo *Programa International Co-operation for Development* (DGXII, INCO-Dev), da Comissão Europeia, no âmbito do Quinto Programa-Quadro nomeadamente para **contribuir para o desenvolvimento económico, social e científico sustentável dos países (africanos) em desenvolvimento,** apresenta-se nesta secção um extracto da proposta de TILAK VIEGAS (1999), intitulada "**Regional Workshop on Policies for Land Use in Southern Africa in the context of the Liberalisation of Trade in Agricultural Products, African Food Security and the Development of Eco-Tourism: Issues and Opportunities**".

5.2 Temas para Reflexão

1. *Together, the Southern African Countries have one of the most favourable populations vs. natural resources ratios in Sub-Saharan Africa and possibly in the world. Although population has been expanding at a fast pace in recent decades, there has also been a marked change in its spatial distribution, caused by the direct and indirect impact of urbanisation and the transformations in social and economic structures.*

2. *As Southern Africa enters a new cycle of peace and stability, there is a visible tendency towards greater economic integration, giving continuity to the political co-operation process that began in the early 1980's with the establishment of SADC. This economic integration is likely to affect the way in which natural resources will be used, directly as "natural capital"*

in the economic development process, and indirectly through the impacts of anthropogenic activity in the environment.

3. *"Natural Capital" constitutes an important element of investment in societies where financial resources are relatively scarce. Using natural capital in a sustainable way means that the opportunity for several "reuses" in future will exist, fuelling several cycles of economic growth. Depleting the natural capital base to levels beyond recovery prevents reuse on a permanent basis. This is the reason why a careful analysis of the pressures bearing on land resources is required, if adequate land use planning policies and procedures are to be implemented.*

4. *In fast changing societies such as the ones of Southern Africa, several types of pressure are at work simultaneously and they deserve careful analysis if policy interventions are being considered to reinforce positive developments and discourage negative ones. Amongst these forces, showing varying degrees of interrelation, are:*

- *Growing demand for agricultural land by smallholders and commercial farming, with potential or actual conflicts between these two groups, leading to massive ecosystem conversion;*
- *Direct pressure on the land from urbanisation and indirectly through higher demand for food, fuelwood, leisure (hunting) and urban pollution;*
- *Pressure from international trade and investment willing to capitalise on the capital assets (natural and human) with a view mainly to producing commodities for export;*
- *Pressure from non-agricultural users of natural resources such as water and energy (fuelwood, hydro).*

5. *Demographic growth, urbanisation, economic development and the liberalisation/globalisation of the economy may create considerable pressure on land resources, leading to desertification and land degradation, but they also open considerable opportunities for development. New and more affluent markets are opened, locally and internationally. Traditional products find new niches, bringing producers into mainstream economic life. Sustainable forms of ecosystem use (e.g. wildlife tourism) develop and provide important sources of revenue. And new incentives (beyond traditional ones associated with the survival of subsistence farmers) emerge to conserve land resources and exploit them in a sustainable way.*

6. *Using these opportunities to promote policies that capitalise on land resources, in the context of the national, regional and international marketplaces, constitutes a political objective for every country and region, not to speak of the internationally agreed AGENDA 21 and related* ***Conventions on Biodiversity and Desertification****. Research can contribute to the development of these opportunities in many different ways: through policy research, through the development of new products and services based on natural capital and through support to the design and operation of sustainable management systems for natural resources.*

7. *A first step in the identification of policy research objectives is the recognition of the multiplicity of resources making up "land" as well as of the multiplicity of sectors using "land" resources for various purposes. By "land" one should understand the complex of land "sensum strictum", hydrological resources and living resources. Sectors using land are agriculture, mining, fishing and aquaculture, urban centres, industries, energy, tourism, etc. Land use practices have considerable impact on the way societies live and organise*

themselves and these societal features are also closely related to the way in which natural resources are used and managed. Scientific and technological progress contributes also markedly to change the way in which we use and manage land resources as well as changing our perceptions about its value. Scientific and technological knowledge, associated to investments in human and institutional capital, constitute a powerful source of pressure to promote the sustainable use of natural resources and a critical element in the design of land use policies.

8. *Three main areas for discussion emerge from these considerations on land use policies, with a fourth area cutting across all three:*

- *Land occupation and use patterns by agriculture and opportunities for ensuring regional food security and employment as well as the exploitation of opportunities in the global market;*
- *Conservation and economic exploitation of natural resources through new products and services targeting regional and international markets;*
- *Interactions between land use and the sustainable development of water and energy resources in the context of regional integration of transport, energy and communications infrastructure and regional and international trade flows;*
- *The fourth area, common to all the three above, addresses investments in human and institutional capital required to promote regional sustainable land use, with emphasis on the opportunities created by the Information Society.*

9. *The responsibility at official level for these areas is vested in several agencies in the SADC countries. Similarly, scientific and technical competencies are distributed through several institutions, including research organisations and universities. This is why a discussion organised along the three main thrusts must necessarily be carried out in a interdisciplinary way, associating physical and social sciences (including a major economics component) in a constructive way, determined exclusively by the problem-solving capacity of these sciences and not by scientists own disciplinary interests. This type of discussion requires a good mix of the relevant scientific and technical competencies, as well as the involvement of participants who are active in policy analysis and/or decision making affecting land use.*

6. COOPERAÇÃO CIENTÍFICA DE ONGs COM OS PAÍSES DE LÍNGUA OFICIAL PORTUGUESA (BRASIL E ÁFRICA)

6.1 Simpósios de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa (SILUSBA)

6.1.1 O 1º SILUSBA, Lisboa 1994

O 1º SILUSBA, realizou-se em Lisboa, em Abril de 1994. **O autor, Presidente da Comissão**

Directiva da Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos (APRH) no biénio 1992/94, lançou a ideia dos Simpósios de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa (SILUSBA), tendo feito parte das Comissões Directiva (1994) e Organizadoras (1995 e 1997), que lançaram os SILUSBA, em Portugal (Abril de 1994), no Brasil (Novembro de 1995), e nos PALOP (em Moçambique, Abril de 1997).

Os *SILUSBA* continuam uma série de eventos da **Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos (APRH) e da Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH)** iniciada em 1983, em Blumenau, Brasil, sob a designação de *Simpósios Luso-Brasileiros de Hidráulica e Recursos Hídricos* (*SILUSB*). Após cinco edições (em 83, 86, 87, 89 e 91), estes simpósios passaram, como se referiu anteriormente, a ter o universo de representação formalmente alargado aos Países do Continente Africano de Língua Oficial Portuguesa. O 6º SILUSB passou a incluir técnicos dos PALOP e a ter a seguinte designação *1º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa (1º SILUSBA).*

A génese dos **SILUSBA** vem descrita em LOBO-FERREIRA (1994a):

...realçamos, com o prazer, o nascimento do 1º SILUSBA no âmbito das actividades levadas a cabo pela Comissão Directiva da Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos no biénio 1992/93. *Em paralelo com o 2º Congresso da Água, realizou-se em Lisboa, em Abril de 1994, o 6º SILUSB / 1º SILUSBA - Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa. A APRH e a ABRH davam deste modo, publicamente, reconhecimento à mais valia técnica, científica e humana existentes nos novos Países Irmãos de Língua Oficial Portuguesa em África. Por direito próprio passaram, a partir de 1994, a dispor de um fórum especializado, no domínio dos Recursos Hídricos, para apresentação ao mundo de expressão portuguesa dos resultados das suas actividades de investigação e técnicas.*

Os Simpósios de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa têm os seguintes objectivos principais:

- promover o avanço e o intercâmbio de conhecimentos técnico-científicos entre Portugal, Brasil e os Países Africanos de Língua Oficial Portuguesa;
- apresentar e confrontar experiências nos domínios da Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente;
- estimular acções de formação, de investigação e de desenvolvimento de interesse comum.

6.1.2 O 2º SILUSBA, Recife, Brasil, 1995

6.1.2.1 Introdução

O 2º SILUSBA, realizou-se no Recife, em Novembro de 1995, em simultâneo com o XI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídrico, organizado pela Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH). O tema central do Simpósio foi o **Desenvolvimento Sustentável dos Recursos Hídricos**, tendo o Volume 2 do Simpósio sido intitulado **Águas Subterrâneas** e abrangido os seguintes sub-temas:

- A água como factor de desenvolvimento em regiões semi-áridas;
- **Águas Subterrâneas;**
- **Vulnerabilidade e protecção de águas subterrâneas.**

6.1.2.2 Mensagem da Comissão Organizadora Brasileira

As preocupações brasileiras em relação aos problemas dos recursos hídricos, nomeadamente a situação de carência habitual e frequente de seca prolongada no Nordeste Brasileiro, estão bem patentes na Mensagem do Presidente da Comissão Organizadora Brasileira Local, José Almir Cirilo:

À medida que as diferentes regiões do país se desenvolvem, mais intenso é o uso dos recursos hídricos, maior é o potencial de conflitos entre os usos e maiores os riscos de degradação da qualidade dos corpos de água. Assim a água precisa ser gerida como um bem escasso e de alto valor econômico.

Alguns dos desafios que os estados do Nordeste têm enfrentado e continuarão a enfrentar nas próximas décadas estão relacionados com o aproveitamento e o controle dos recursos hídricos. Nesse campo, precisam solucionar, para o seu desenvolvimento econômico e social problemas fundamentais como:

- *combate às secas no semi-árido, como uma das formas de superação do grave subdesenvolvimento, regional;*
- *saneamento básico, com abastecimento de água, coleta e tratamento de esgotos urbanos para a maior parte da população ainda não atendida;*
- *irrigação de culturas agrícolas, para elevação da produtividade e da produção, abrangendo a considerável área fértil existente;*
- *controle da poluição das águas de origem urbana, industrial e agrícola, de modo a atender à preservação do meio ambiente e à melhoria da qualidade de vida da população;*

- *controle de cheias e prevenção de inundações, notadamente em áreas urbanas.*

Nesse quadro a discussão sobre o Desenvolvimento Sustentável dos Recursos Hídricos, tema de nosso XI Simpósio, é de absoluta propriedade e relevância. O Estado de Pernambuco sente-se honrado em acolher os congressistas de todo o País e do exterior, certo de que surgirão importantes contribuições sobre o assunto.

6.1.2.3 Exemplos de Problemas dos Recursos Hídricos Subterrâneos das Regiões Semi-áridas do Brasil

Visando tomar conhecimento das necessidades de investigação, preocupações e as linhas de acção comuns a vastas áreas da América Latina, em geral, e do Brasil, em particular, carenciadas em recursos hídricos, apresenta-se um extracto de COSTA e COSTA FILHO (1995) salientando-se o **Programa de Aproveitamento das Águas Subterrâneas no Semi-Árido Nordestino,** apresentado ao XI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos / 2º SILUSBA. Recorda-se que o tema desses Simpósios foi o **Desenvolvimento Sustentável dos Recursos Hídricos.**

Na região semi-árida, do Nordeste do Brasil, onde apenas os rios São Francisco e Pamaiba são natural e inteiramente perenes, independentemente do controle de reservatórios artificiais, os ***mananciais hídricos subterrâneos*** *desempenham importante papel para os diversos tipos de uso consuntivo da água.*

Apesar do relevante papel que desempenham, esses recursos não vêm sendo estudados detalhadamente, nem sob o ponto de vista quantitativo - reservas e recursos exploráveis - nem tão pouco quanto a qualidade das suas águas, riscos de poluição, tendências à salinização*, etc.*

Em recente estudo realizado pela SEPLAN da Presidência da República, no contexto do Projeto ARIDAS, foi ressaltada a ausência de estudos mais detalhados para avaliação das reservas, recarga e até mesmo, da disponibilidade instalada de obras hídricas, para avaliação das retiradas de água dos diversos aqüíferos Os estudos mais recentes existentes foram efetuados ainda na década de 70 pela SUDENE, a nível muito regional.

Os recursos hídricos subterrâneos são abundantes no Nordeste, porém mal distribuídos, ocorrendo "superavit' nos Estados do Maranhão e Piaui, relativo à bacia sedimentar do Maranhão, e "déficit" nos demais Estados, sobretudo na região semi-árida, pois a faixa costeira, de clima tropical chuvoso também possui abundância desses recursos. Além de deficitário, esses recursos são, na maior parte do semi-árido, de má qualidade em virtude dos elevados teores de sais.

COSTA e COSTA FILHO (1995) concluíram que:

a) mesmo reservando-se uma disponibilidade de restituição aos cursos d'água superficiais equivalente a 70% da recarga anual dos aqüíferos o total anual disponível para exploração de águas subterrâneas no nordeste do Brasil é da ordem de 20 bilhões de metros cúbicos anuais, ou seja, mais de 40 vezes a disponibilidade usual atual;

b) as águas subterrâneas somente assegurariam o atendimento total da demanda, nos Estados do Maranhão e Piaui, onde as reservas hídricas exploráveis da Bacia Sedimentar do Maranhão totalizam 13 bilhões de m^3/ano, superando toda a demanda hídrica naqueles dois Estados, e correspondendo a 85% da demanda de todo o nordeste, para todos os usos consuntivos;

c) a situação no Estado da Bahia seria de atendimento quase, total, caso a distribuição dos aqüíferos fosse homogênea; com efeito, os recursos exploráveis atendem a 85% da demanda total, porém esses aqüíferos não ocorrem em mais do que 60% da área do Estado;

d) em todos os demais Estados, os recursos hídricos subterrâneos, dentro da margem de segurança adotada para a sua exploração, contribuem apenas como complemento do hídricos superficiais para atendimento da demanda hídrica.

Concluindo a sua comunicação COSTA e COSTA FILHO (1995) propõem o seguinte **Programa de Aproveitamento das Águas Subterrâneas no Semi-Árido Nordestino:**

O programa para aproveitamento adequado das águas subterrâneas no semi-árido nordestino, envolverá, dentre outras, as seguintes acções:

- *cadastramento de todas as obras de captação;*
- *realização de estudos hidrogeológicos a nível de detalhe, visando avaliar precisamente as reservas e recursos exploráveis;*
- *recuperação de poços abandonados, com instalação, quando for necessário, de equipamento de dessalinização da água;*
- *monitoramento da exploração dos aqüíferos visando a sua proteção e preservação quantitativa;*
- *perfuração de poços profundos em bacias sedimentares e aqüífero físsural e poços em depósitos sedimentares de pouca espessura;*
- *realização de estudos e posterior implantação onde recomendável, de barragens subterrâneas e de barragens de assoreamento;*
- *desenvolvimento de campanha de esclarecimento público acerca da correta utilização das águas subterrâneas, evitando desperdícios e depreciação de aqüíferos;*
- *implantação de leis que assegurem o controle do uso e conservação dos mananciais subterrâneos;*
- *zoneamento qualitativo e quantitativo dos aqüíferos; e*
- *planejamento do uso racional dos recursos hídricos subterrâneos.*

6.1.3 O 3º SILUSBA, Maputo, Moçambique, 1997

A Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos (APRH), a Associação Brasileira dos Recursos Hídricos(ABRH) e a Associação Moçambicana de Ciência e Tecnologia (AMCT)

organizaram em conjunto o 3º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa (3º SILUSBA) cuja realização em Maputo, em Abril de 1997, constituiu um momento alto no panorama técnico-científico nacional moçambicano. As comunicações ao 3º SILUSBA subordinaram-se aos seguintes temas:

- Recursos Hídricos
- Saneamento Básico
- Irrigação e Drenagem
- Hidroenergia
- Ambiente

O número de comunicações e de participantes portugueses foi, até à data, o maior, num Simpósio da APRH realizado fora de Portugal, o que reflectiu a grande expectativa em torno deste evento realizado num PALOP. Podendo o SILUSBA ser já considerado um clássico para as comunicações técnico-científicas dos países envolvidos, o sucesso desta edição consolidou a continuação do mesmo. Foi assim largamente recompensado o esforço desenvolvido no sentido de proporcionar o debate de ideias no domínio da Hidráulica e dos Recursos Hídricos, entre os cientistas e técnicos portugueses e os colegas de Angola, Brasil, Cabo Verde, Guiné-Bissau, Moçambique e São Tomé e Príncipe.

6.2 Simpósios Luso-Brasileiros de Engenharia Sanitária e Ambiental (SILUBESA)

6.2.1 Considerações Gerais

No âmbito de outras actividades desenvolvidas pelo **autor** no âmbito de ONGs para **permuta de conhecimentos tecnico-científicos entre Portugal e o Brasil**, destaca-se a sua acção como ***Coordenador-Geral para Portugal*** do VI Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental (VI SILUBESA).

O VI SILUBESA - Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, foi co-organizado pela ABES, Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental e pela APRH, e realizou-se em Florianópolis, no Brasil, de 12 a 16 de Junho de 1994. O Tema Geral do VI SILUBESA, escolhido pela Coordenadora brasileira, foi **Recursos Hídricos -**

Preservar para Garantir. O tema foi tratado em 11 Sessões de Trabalho, três Painéis, uma Mesa Redonda e um Ciclo de Palestras.

O número total de participantes do Simpósio excedeu as quatro centenas, tendo afluído de todo o Brasil e de Portugal. Salienta-se o elevado interesse motivado pelo VI SILUBESA junto das autoridades ambientais federais brasileiras e estaduais de Santa Catarina. Assim, por exemplo, participou activamente nos trabalhos o Secretário de Coordenação dos Assuntos do Meio Ambiente, Prof. Haroldo Mattos de Lemos.

Foi possível, ao longo das sessões técnicas, estreitar os laços científicos com o Brasil, tendo a APRH realçado a **disponibilidade portuguesa para trocar experiências científicas e de gestão de Recursos Hídricos, não só com o Brasil mas também com os nossos colegas dos PALOP.**

6.2.2 Recomendações para Acção Aprovadas no VI SILUBESA

No último dia dos trabalhos foi apresentada pela APRH, subscrita pelo **autor, na sua qualidade de Presidente (cessante) da Comissão Directiva da APRH**, a Recomendação 2.1.3, que foi aprovada por unanimidade, e que se apresentou, juntamente com as outras Moções e Recomendações brasileiras, no Boletim Informativo da APRH nº 83 de Outubro de 1994 (*cf.* LOBO-FERREIRA, 1994b), que se resume em seguida:

Considerando:

1. *elevado nível científico existente em Portugal e no Brasil na área dos Recursos Hídricos (RH), nomeadamente em Universidades e Instituições de Investigação Científica nacionais e estaduais;*
2. *a centenária experiência técnica de gestão de RH em Portugal e no Brasil;*
3. *relevo e a responsabilidade da APRH, ABES, ABRH e ABEMA, como ONGs, nas respectivas áreas de influência, em Portugal e no Brasil,*

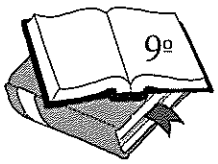
Recomenda-se:

1. *que a APRH, ABES, ABRH e ABEMA, desenvolvam em conjunto e/ou em separado, em Portugal e no Brasil, acções de sensibilização junto das entidades nacionais e regionais/estaduais, visando que as legislações sobre Gestão de RH em elaboração se baseiem, com clareza e coerência científica, nos princípios universalmente aceites da Gestão dos RH, nomeadamente no que se refere à gestão por bacias hidrográficas,* ***à gestão integrada de RH (quantidade/qualidade, superficiais/subterrâneas,*** *etc.);*
2. *que a legislação actualmente em vigor que não contenha esses princípios venha a ser revista a curto prazo.*

Implementação:

1. *realização pela APRH, ABES, ABRH e ABEMA, de encontros de reflexão sobre Gestão de RH com as entidades governamentais nacionais e/ou regionais/estaduais portuguesas e brasileiras;*
2. *realização de grupos de trabalho pela APRH, ABES, ABRH e ABEMA, para intervirem activamente em processos de análise crítica e de pareceres quando solicitados pelas entidades nacionais e regionais que sejam governamentais, de oposição, parlamentares, etc.;*
3. ***permuta e divulgação de informação técnico-científica** entre Portugal e Brasil sobre Gestão de RH, nomeadamente pela APRH, ABES, ABRH e ABEMA.*

CAPÍTULO NONO



PLANO DE ESTUDOS SOBRE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Resumo do Capítulo

Para o Programa de Investigação que se apresenta, relativo ao *Concurso de acesso a Investigador Coordenador do Laboratório Nacional de Engenharia Civil*, foi seleccionado o tema **Inventariando, Monitorizando e Gerindo de Forma Sustentável Recursos Hídricos Subterrâneos - A Situação Portuguesa, os Desafios da União Europeia e a Globalização.**

Feita a apresentação, nos Capítulos Segundo ao Oitavo, de *uma síntese dos conhecimentos existentes sobre o tema a tratar* e *uma apresentação crítica dos problemas já tratados e dos problemas em aberto* em Portugal, na União Europeia e no resto do Mundo, desenvolve-se neste Capítulo Nono *um plano de estudos relativo a alguns desses problemas,* citando *a*

metodologia proposta, o planeamento dos meios necessários, os objectivos a atingir e os benefícios operados da sua realização.

Procurando contribuir para minorar as consensuais carências de investigação correspondentes aos grandes problemas globais de águas subterrâneas nas áreas seleccionadas para temas dos Capítulos Segundo ao Quinto (*i.e.* **recarga** de aquíferos, **vulnerabilidade à poluição**, **monitorização** de águas subterrâneas, **protecção** e **reabilitação** de aquíferos e **gestão optimizada** de águas subterrâneas), propõe-se neste Capítulo Nono *um plano de estudos relativo a alguns desses problemas,* citando *a metodologia proposta, o planeamento dos meios necessários, os objectivos a atingir e os benefícios operados da sua realização.*

O plano de estudos compreende doze Projectos de Investigação sobre os temas analisados neste Programa de Investigação, incluindo duas Acções Concertadas de Investigação. Os Projectos prevêem aplicações em regiões nacionais (Continente e Regiões Autónomas dos Açores e da Madeira), em outras regiões europeias (da UE e do Leste Europeu), e ainda em três outros continentes (no africano, no americano e no asiático). Privilegiou-se a cooperação com os PALOP, com o Brasil, com a China e com a Índia, países com os quais Portugal tem tido forte ligação ao longo de grande parte da nossa História.

Neste livro apresenta-se a parte não-confidencial desses Projectos de Investigação e Acções Concertadas de Investigação, *i.e.* apresenta-se todo o conteúdo científico e exclui-se a componente "*administrativa*" como o nome dos potenciais clientes, os custos, a distribuição de pessoas-mês e os calendários, que se desenvolverão de 2000 a 2007.

PLANO DE ESTUDOS SOBRE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

1. INTRODUÇÃO

Para o Programa de Investigação que se apresenta, relativo ao *Concurso de acesso a Investigador Coordenador do Laboratório Nacional de Engenharia Civil*, foi seleccionado o tema **Inventariando, Monitorizando e Gerindo de Forma Sustentável Recursos Hídricos Subterrâneos - A Situação Portuguesa, os Desafios da União Europeia e a Globalização.**

Feita a apresentação, nos Capítulos Segundo ao Oitavo, de *uma síntese dos conhecimentos existentes sobre o tema a tratar* e *uma apresentação crítica dos problemas já tratados e dos problemas em aberto* em Portugal, na União Europeia e no resto do Mundo, desenvolve-se neste Capítulo Nono *um plano de estudos relativo a alguns desses problemas*, citando *a metodologia proposta, o planeamento dos meios necessários, os objectivos a atingir e os benefícios operados da sua realização.*

Apresenta-se um ***plano de estudos*** que visa a continuação dos estudos sobre Águas Subterrâneas, iniciados no LNEC, nos Departamentos de Geotecnia e de Hidráulica, na década de setenta.

Neste livro apresenta-se a parte não-confidencial desses Projectos de Investigação e Acções Concertadas de Investigação, *i.e.* apresenta-se todo o conteúdo científico e exclui-se a componente "*administrativa*" como o nome dos potenciais clientes, os custos, a distribuição de pessoas-mês e os calendários, que se desenvolverão de 2000 a 2007.

2. SÍNTESE DAS CARÊNCIAS DE INVESTIGAÇÃO DETECTADAS NA ANÁLISE EFECTUADA NOS CAPÍTULOS SEGUNDO AO OITAVO

No **Capítulo Segundo** foram revistos numerosos estudos de investigação programada, aplicada ou por contrato, recentemente desenvolvidos ou em desenvolvimento a nível nacional, comunitário ou internacional, sobre a avaliação da **recarga de aquíferos** e sobre a avaliação da **vulnerabilidade à poluição** de águas subterrâneas.

Foi a seguinte a **síntese conclusiva sobre a aplicação de métodos de avaliação de recarga**

de aquíferos apresentada no Capítulo Segundo:

- Em Portugal, embora tendo já sido aplicados a maioria dos métodos anteriormente apresentados, observa-se uma maior aplicação dos métodos de balanços hídricos sequenciais, do método de balanços de cloretos e, mais recentemente, o método da decomposição de hidrogramas. Na vizinha Espanha, tem sido aplicado, com frequência, o métodos do balanço de trítio.
- É agora importante o desenvolvimento de estudos de calibração de métodos de avaliação da recarga regional de aquíferos, nomeadamente dos métodos desenvolvidos no LNEC (*cf.* VERMEULEN *et al.* (1993 e 1994), OLIVEIRA *et al.* (1997a e 1997b) e OLIVEIRA, 1997), para permitir a comparação dos seus resultados com os obtidos por outras técnicas de avaliação da recarga de aquíferos, nomeadamente das descritas anteriormente, no Capítulo Segundo.

Neste Capítulo Nono propõe-se um Programa de Investigação para o desenvolvimento deste tema na perspectiva da continuação, aprofundamento, calibração e validação de métodos de avaliação da recarga de aquíferos desenvolvidos no LNEC.

Em relação à **aplicação de métodos de avaliação da vulnerabilidade à poluição de aquíferos**, salientam-se em seguida as recomendações de MERCHANT (1994) sobre investigação a desenvolver sobre vulnerabilidade à poluição:

- *Estudos comparativos para determinar se resultados equivalentes aos do método DRASTIC podem ser obtidos usando (1) menos variáveis e/ou (2) uma formulação do modelo menos propensa a reflectir possíveis interdependências entre factores;*
- *Especificações adicionais relativas a modificações adicionais do modelo DRASTIC para incorporação de novos parâmetros (e.g. uso do solo, ocupação do solo; aplicações de produtos químicas na agricultura, densidade de captações, tipo e intensidade de rega, práticas de conservação do solo tais como terraceamento), ou ligação a modelos complementares tais como modelos de zonamento ou modelos de avaliação de risco;*
- ***Investigação sobre factores de escala**, incluindo investigação sobre os impactos dos compromissos assumidos na utilização dos dados, nas classificações e nas escalas de pesos, sobre os resultados do modelo;*
- *Expansão do DRASTIC através da utilização de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) avançados desenvolvidas para análises a 3 dimensões, modelos de transporte por elementos finitos, e modelação sequencial/temporal;*
- *Cooperação entre cientistas de recursos hídricos para assegurar que o modelo reflecte de facto o conhecimento mais actualizado dos processos em análise, e que o modelador hidráulico usa todas as potencialidades dos SIG;*
- *Utilização de sistemas periciais para permitir a incorporação de conhecimento especializado através da análise **fuzzy logic** e de regras lógicas (especialmente para atribuição das classificações/pesos, expressão das relações interfactores, e uma correcta interpretação do índice DRASTIC no contexto do conjunto de dados hidrogeológicos específicos em análise);*
- *Investigação dos meios a utilizar nos SIG para **validação e verificação do desempenho***

***dos modelos**; e*

- *Investigação dos meios (e.g. dos multimedia)* ***para*** *auxiliar os agentes planeadores, os gestores de recursos hídricos e outros agentes decisores (i.e.* ***policy-makers*** *e* ***decision-makers)*** *na* ***compreensão e utilização efectiva dos resultados do modelo DRASTIC.***

Tendo em atenção estas considerações e os resultados da análise desenvolvida no Capítulo Segundo foi a seguinte a síntese conclusiva sobre **aplicação de métodos de avaliação da vulnerabilidade à poluição de aquíferos** em Portugal:

- Foram já aplicados alguns dos métodos anteriormente apresentados, observando-se um maior número de aplicações dos métodos clássicos e do método DRASTIC.
- É agora importante o desenvolvimento de estudos de calibração dos métodos de avaliação da vulnerabilidade à poluição de aquíferos, nomeadamente do método DRASTIC, para permitir a comparação dos seus resultados quantitativos (*i.e.* em termos de valor do índice) e qualificativos (*i.e.* qualificando as classes de vulnerabilidade em termos de "*muito elevada*", "*elevada*", "*média*", "*baixa*" e/ou "*muito baixa*") com os resultados da campanha de análises da qualidade de água dos sistemas aquíferos de Portugal, *e.g.* do Baixo Tejo e Sado monitorizados pelo LNEC para o Instituto da Água no âmbito dos estudos desenvolvidos para o Plano de Bacia do rio Tejo, durante Outubro e Novembro de 1998 (*cf.* LOBO-FERREIRA *et al.*, 1999).
- É também importante a comparação desses resultados quantitativos e qualificativos com os obtidos por outras técnicas das quais se salienta a *Geofísica na Detecção e Parametrização de Aquíferos*. Assim, por exemplo, será interessante comparar os resultados apresentados por GONÇALVES e ANDRADE AFONSO (1998) no seu estudo "**Geofísica na Protecção dos Recursos Hídricos. Mapeamento de Zonas de Risco no Vale do Tejo-Sado Recorrendo a Prospecção Geoeléctrica**" (onde os autores desenvolvem uma análise das zonas mais ou menos permeáveis no Vale do Tejo interpretando levantamentos geoeléctricos) com os resultados apresentadas pelo autor ao 4º Congresso da Água (*cf.* LOBO-FERREIRA, 1998) na comunicação "**Vulnerabilidade à poluição de águas subterrâneas: Fundamentos e conceitos para uma melhor gestão e protecção dos aquíferos de Portugal**".

Salientou-se no **Capítulo Terceiro** que a monitorização quantitativa e a monitorização qualitativa de águas subterrâneas foi desenvolvida, em Portugal, à escala nacional (NUTS I) desde 1978, pela ex-Direcção Geral dos Recursos e Aproveitamentos Hidráulicos e desde o início da década de 90 pelo Instituto da Água - INAG. No entanto, desde 1993 estas responsabilidades foram transferidas para as Direcções Regionais de Ambiente e Recursos Naturais - DRARNs. De acordo com LOBO-FERREIRA *et al.* (1996), actualmente, devido a dificuldades orçamentais e a carência de pessoal, **só se está a levar a cabo muito restritamente a monitorização de águas subterrâneas à escala regional** (NUTS II).

É importante contribuir através das acções resultantes do desenvolvimento do Plano de

Estudos que se propõe neste Capítulo Nono para que se ultrapassem as carências de informação resultantes da ausência de monitorização que se tem sentido no País desde 1994, excepto para a zona da DRA Algarve. Sugere-se assim a implementação de um Plano Nacional de Monitorização de Águas Subterrâneas pelo Instituto da Água. Esse Plano Nacional contaria com várias acções:

- Implementação de redes expeditas **à escala regional** (NUTS II) em todo o território continental.
- Implementação de redes de monitorização locais nas ***zonas mais vulneráveis*** à poluição de aquíferos e nas ***zonas de risco*** localizadas próximo de fontes poluentes reais ou potenciais, como por exemplo antigas lixeiras e novos aterros sanitários municipais ou multimunicipais.

Referiu-se no **Capítulo Quarto** que a protecção dos recursos hídricos subterrâneos e a prevenção da ocorrência de fenómenos futuros de poluição é um passo vital para a utilização sustentável deste recurso. A implementação de estratégias nesse sentido deve basear-se no planeamento dos recursos disponíveis, nomeadamente através da caracterização da vulnerabilidade dos aquíferos à poluição, na definição de **perímetros de protecção** das captações e na salvaguarda das áreas de recarga.

Pese embora o lugar de destaque e de prioridade que as acções e estratégias de preservação dos recursos hídricos subterrâneos merecem, o actual estado de degradação de alguns destes recursos impõe a **necessidade de se proceder também a acções de reabilitação**. Este tipo de acções deveria idealmente ser efectuado num curto prazo após a detecção da poluição, por forma a evitar tempos de operação mais longos e onerosos.

Tendo em conta situações locais particulares, deveria ser permitida a adopção de medidas de protecção activa para os aquíferos captados, em vez de se submeter o território a obrigações de difícil aplicação e controlo, caracterizadas por uma relação custo/benefício não sustentável pela comunidade local/regional envolvente. Essas medidas deveriam ser representadas pela:

- implementação de redes de monitorização do aquífero, com piezómetros localizados no interior e imediatamente a montante da isócrona de 50 dias, tendo em conta as potenciais fontes de poluição presentes no interior e no exterior adjacente à isócrona;
- realização de depósitos centrais que permitam recolher a água captada, de modo a se conseguir a rápida instalação de um sistema de tratamento no caso de confirmada uma situação de contaminação.

Refere-se ainda no capítulo Quarto que a tomada de consciência da deterioração da qualidade

das águas subterrâneas e da sua sobreexploração torna necessária a adopção de novas medidas de gestão, de protecção e de reabilitação deste recurso, no quadro de um desenvolvimento sustentável.

A **aplicação de tecnologias de contenção/reabilitação da poluição *in situ*** é muito promissora, nomeadamente por apresentar as seguintes vantagens: (1) as associadas ao facto de não haver necessidade de remoção e de transporte de águas e/ou de solos para tratamento num outro local e (2) as traduzidas pela aceleração dos processos de descontaminação relativamente às técnicas que consideram isoladamente a remoção para tratamento.

Em relação às linhas de investigação futura em Optimização e Gestão de águas subterrâneas salientam-se, com base na análise crítica desenvolvida no **Capítulo Quinto** as seguintes reflexões:

- A gestão de sistemas de águas subterrâneas não-lineares foi bem resolvida por diversas técnicas, mais dentro do campo dos algoritmos da Programação Linear do que no campo da Programação Não-Linear. Estas técnicas, pelo contrário, podem ser ferramentas eficazes para tratar problemas de gestão de águas subterrâneas com funções objectivo não-lineares.
- As maiores limitações correntes dos modelos disponíveis de S/O, pelo menos na área do abastecimento por águas subterrâneas, parece ser a sua aplicação num quadro determinístico. Aplicações estocásticas ou do tipo *chance-constrained*, incorporando parâmetros de incerteza relativos às águas subterrâneas e às condições de fronteira têm tido pouca aplicação. Em consequência, a abordagem óptima para a tomada de decisões em águas subterrâneas não é adequada à filosofia emergente baseada no risco, em questões relativas a projectos de engenharia com componentes hidrogeológicas. Num esquema de optimização do tipo *chance-constrained*, é admitida a probabilidade de se falhar uma restrição, mas não é usualmente acoplado o custo de insucesso em termos monetários. Em resumo, sem o desenvolvimento de investigação apropriada dirigida para a remoção destas limitações, outras ferramentas de tomada de decisão, menos gerais mas mais versáteis e adaptadas a abordagens do tipo *risk-balancing*, poderão vir a ser preferidas.
- Outra área de investigação, ainda subestimada, é a da integração em modelos únicos, da gestão do abastecimento por águas subterrâneas e da gestão da qualidade das águas subterrâneas para a determinação de estratégias de utilização de águas subterrâneas que juntem à satisfação óptima das necessidades de água a satisfação das restrições ou dos objectivos especificados de qualidade das águas subterrâneas. Na verdade, a investigação sobre o tema da gestão da qualidade das águas subterrâneas, ligada à necessidade das acções de reabilitação de aquíferos, recebeu um grande impulso na última década. Um esforço de investigação equivalente deveria ser feito para permitir o cruzamento de considerações de qualidade de águas subterrâneas com as do contexto de engenharia do abastecimento por águas subterrâneas, uma vez que seria melhor evitar a degradação da qualidade das águas subterrâneas em vez de se ter de implementar estratégias de reabilitação posteriores. Esta necessidade é particularmente sentida na exploração de

aquíferos costeiros.

No Capítulo Sexto salientou-se que a incorporação dos conhecimentos adquiridos dos numerosos estudos já desenvolvidos ou em curso em todas as regiões do País sobre Recursos Hídricos Subterrâneos, parte significativa dos quais se sumariza nesse Capítulo, **paralelamente com o início de novos estudos de Investigação Programada nos próximos 5 anos, de 1999 a 2004**, permitirá seguramente responder aos desafios da União Europeia em matéria de cumprimento das exigências e desafios que se põem a Portugal para cumprimento do ***Programa de Acção para a Protecção e a Gestão Integrada das Águas Subterrâneas*** (*Action Programme for Integrated Groundwater Protection and Management, GAP*), descrito no Capítulo Terceiro. O GAP enfatiza a importância da protecção das águas subterrâneas, incluindo a necessidade da designação de zonas onde as águas subterrâneas são particularmente importantes ou estão particularmente ameaçadas, **recomendando o incremento da monitorização quantitativa e qualitativa das águas subterrâneas.**

No **Capítulo Sétimo** referiram-se algumas das considerações tecidas por GANOULIS *et al.* (1992) de que se salienta:

- as regiões da União Europeia e os Estados-Membros têm interesse próprio em desenvolver **redes de monitorização de águas subterrâneas**, básicas ou de referência;
- as redes nacionais ou regionais devem produzir resultados fiáveis e comparáveis a nível europeu.

Também no **Capítulo Sétimo** salientaram-se as conclusões de REINIGER e LOBO FERREIRA (1993) sobre necessidades de investigação em recursos hídricos. Destacam-se as seguintes reflexões relativas a águas subterrâneas:

The individual research areas highlighted in the SD (i.e. Strategic Dossier) were ranked by participants' vote in three categories:

1 - Very important, must be included in future programmes or projects;

2 - Important, could be included in future projects;

3 - Not important, not to be considered for future projects.

*After votes were counted, the following areas were included in category 1 (**very important**):*

- ***Modelling and monitoring techniques for freshwater systems (especially ground waters and sediments).***

Additional items also considered important by the participants, as research topics to be addressed in future EC programmes or projects were:

- ***unsaturated zone, for which there is a lack of basic data;***

- *fractured media: flow and pollution;*
- ***nitrate pollution: what to do if the concentration is already too high?***
- ***point pollution vs. non-point pollution;***
- ***reclaiming polluted aquifers;***
- ***recharge of aquifers: natural and artificial. Quality problems of final water.***

Para os diversos "*eixos*" de análise seleccionados pela *Task Force Environment-Water*, com base no Relato efectuado por LOBO-FERREIRA e NUNES CORREIA (1997) relativamente à componente "Recursos Hídricos", MELO BAPTISTA e LOBO-FERREIRA (1997) salientaram as seguintes necessidades de investigação em águas subterrâneas:

- ***fight against pollution (Axis A): preservation and rehabilitation of groundwater quality; in situ remediation of polluted*** *surface and* ***groundwater;***
- ***rational use of water (Axis B): sanitary protection of*** *surface water and* ***groundwater*** *abstraction for domestic purposes;*
- ***fight against water deficits (Axis C):*** *physical and economic integrated* ***management of groundwater*** *and surface waters; environmental impacts of water use in agriculture; methodologies for* ***environmental impact assessment*** *on surface water and* ***groundwater.***

No **Capítulo Sétimo** apresentaram-se ainda os objectivos de investigação sugeridos no "*Workshop on Research Needs in Groundwater Pollution*", organizado pelo Comité "*Groundwater Pollution*" da "*European Science Foundation*", em Göteburg, na Suécia, em Novembro de 1998. Recomendou-se o desenvolvimento das seguintes linhas de investigação para **redução de défices de investigação em poluição de águas subterrâneas:**

- ***Priority list of research needs with respect to physical transport:***
  1. ***characterisation of media for appropriate up-scaling and down-scaling;***
  2. *investigation of transport processes with empasis on the coupling of processes, their reaction dynamics and kinetics;*
  3. *the importance of sludge and sediment transport with groundwaters;*
  4. *modelling of process integration;*
  5. ***a posterior analysis of models;***
  6. ***optimisation coupling tools.***

Research areas to address enabling an understanding of the mobilisation and immobilisation mechanisms are therefore:

- *Humic materials may accelerate the transport rate of the contaminant. The role of moderate or high organic matter content in groundwater should be studied in order to*

quantify carryover of secondary contaminants.

The field investigations as well as the experiments have to be designed in close co-operation of different scientific groups as e.g. geologists, geochemists, biologists and modellers. This target can be achieved by an appropriate funding of interdisciplinary research activities:

- ***Vulnerability of aquifers** to disturbance of steady state conditions in the biogeochemical balance.*
- *Changes in the input-output situation as e.g. variation in the water table may instabilise the geochemical steady state conditions and lead to severe damages, for instance pyrite oxidation. This is reflected in changes in pH and/or pE, leading to changes in the ion content as well as the mobility of pollutants. The factors determining the vulnerability of the system towards such disturbances, e.g. reduction-oxidation capacity or the buffer capacity, are poorly understood and are in need of research effort.*
- *Effects of changing land use on groundwater quality.*
- *Harvesting boreal forests by clear cutting often damages groundwater quality e.g. by increasing the groundwater contents with aluminum and other undesireable ions and also organic substances.*

Similar problems are linked to other changes of land use. The processes linking the biogeochemical groundwater system with deposition, hydrological regime and the living ecosystem are not sufficiently known to give the scientific community tools for predicting or avoiding groundwater damage.

As carências de investigação detectadas a nível europeu poderão vir a ser minoradas com recurso ao Quinto Programa-Quadro e, por exemplo, a acções do programa COST e do programa INTAS (neste caso para intercâmbio científico com os estados europeus do centro e leste da Europa com economias em transição para economias de mercado).

No **Capítulo Oitavo** iniciou-se uma primeira análise das carências de investigação em águas subterrâneas a nível global. Naturalmente, os objectivos de investigação a esta escala são muito mais diversificados do que a nível nacional ou comunitário. Os estádios de desenvolvimento regionais a nível global são imensamente diferentes uns dos outros, sobressaindo de forma gritante necessidades de investigação muitas vezes primárias no contexto europeu. Assim, enquanto que na **Ásia** a explosão demográfica acarreta urgentes necessidades de investigação sobre as **zonas costeiras** (*e.g.* **problemas de intrusão salina em aquíferos costeiros**), em **África** é o fenómeno cíclico da fome e, em muitas áreas, os fenómenos de escassez de recursos hídricos obrigam a uma muito maior atenção em relação aos **problemas de saúde pública,** incluindo o uso da água para a produção de alimentos (*e.g.* **poluição por carências de abastecimento de água e saneamento com as consequentes fontes de poluição pontual** ou problemas de poluição difusa em diversas áreas do Sul de

África). Já na **América Latina** os maiores problemas talvez se relacionem com os fenómenos de escassez de recursos hídricos e com a sua poluição industrial e urbana, tornando imperiosa uma **avaliação cuidadosa dos recursos e um planeamento optimizado da sua exploração e protecção.**

Em relação à problemática da **Gestão de Zonas Costeiras** salientam-se algumas linhas de investigação sugeridas pelo **"A Follow-Up of the First Preparatory Meeting for ASEM Scientific and Technological Ministers", held in Beijing, P. R. China, Nov. 25-26, 1998 - The Draft Portuguese Contribution for the Working Paper on Water Issues** elaborado por LOBO-FERREIRA e TILAK VIEGAS (1999):

The urgency to create mechanisms, which ***search for the harmonisation between the need for economic development on the one side and the need to preserve the natural values and resources of the coastal zone on the other****, is generally recognised. These mechanisms should constitute a* ***Coastal Zone Management System****, integrating economic and environmental considerations on the basis of the concept of ecologically sustainable development.*

Prioridades recomendadas pelo *Portuguese Contribution Paper* para Cooperação ASEM (*cf.* LOBO-FERREIRA e TILAK VIEGAS, 1999):

- *Integrated Water Resources Planning*
- *Water Quality Management*
- *Preservation and Rehabilitation of Groundwater Quality*
- *State of the Environment and Decision Support Indicators*
- *Planning and Management of Water Resources Systems*
- *Optimised Management of Aquifers*
- *Preservation and Rehabilitation of Groundwater Quality*
- *Renewable Groundwater Resources: Evaluation and Calibration of Groundwater Recharge*
- *Research Needs and Monitoring for the Sustainable Management of Coastal Zones*

Neste Capítulo Nono apresenta-se uma *Acção Concertada* para Investigação onde se desenvolvem as prioridades acabadas de referir.

Realça-se a investigação comunitária "horizontal" relacionada com o Quinto Programa-Quadro referente à *International Co-operation for Development* (INCO-DEV) sobre "**políticas**" (*i.e. policy*) mais precisamente para "**satisfação de necessidades básicas: alimentação, água, saneamento e saúde**" (*i.e. meeting basic needs: food, water, sanitation, health*). De TILAK VIEGAS (1999) salientam-se as seguintes reflexões relativas à problemática africana:

1. *In **fast changing societies**, such as the ones of Southern Africa, several types of pressure are at work simultaneously and they deserve careful analysis if policy interventions are being considered to reinforce positive developments and discourage negative ones.*
2. *Three main areas for discussion emerge from considerations on **land use policies**, with a fourth area cutting across all three:*

- *land occupation and use patterns by **agriculture** and opportunities for ensuring regional food security and employment as well as the exploitation of opportunities in the global market;*
- ***conservation and economic exploitation of natural resources** through new products and services targeting regional and international markets;*
- *interactions between land use and the **sustainable development of water** and energy resources in the context of regional integration of transport, energy and communications infrastructure and regional and international trade flows.*

Realizou-se em 1997/98 uma conferência electrónica sobre o tema *Land Use Cover and Change*: *Science Contributions to European Policies*. Perguntava-se nomeadamente o seguinte:

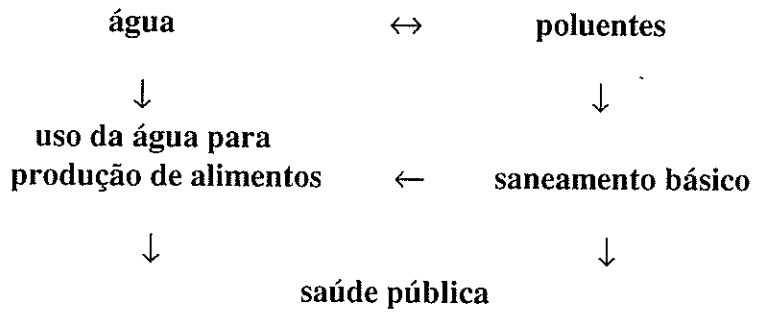
- *Which scientific understanding and results can the community contributes to the LUCC related EU policies?*

Em http://www.icc.es/lucc/conference/confsession2.html#lobo, o autor apresentou uma contribuição relativa ao LUCC do ponto de vista das águas subterrâneas:

- *Our interest in LUCC is mainly concerned with aspects affecting groundwater. Changes in land use and land cover can interfere with qualitative and quantitative standards of groundwater. Qualitative aspects can be affected depending on the vulnerability of the medium and the **vulnerability** itself can be changed as it is related with the land cover and use. Quantitative aspects involve the recharge rates that are also dependent on the land use and cover. Our group has been working on mapping groundwater vulnerability to pollution, using methods in which land use and land cover are incorporated. We suggest the reading of the following documents:*

    - http://www-dh.lnec.pt/gias/novidades/drastic_e.html *and*
    - http://www-dh.lnec.pt/gias/novidades/nato97_vulner_internet.html

Neste Capítulo Nono desenvolve-se um Programa de Investigação dedicado aos países do sul de África (África do Sul, Moçambique e Angola) onde se aprofundam e validam métodos de avaliação da **vulnerabilidade à poluição**, numa perspectiva *LUCC*, procurando dar-se resposta a algumas das prioridades apontadas por TILAK VIEGAS (1999), para o contexto africano e para o programa INCO-DEV. Na opinão de TILAK VIEGAS (1999), esquematicamente, as palavras chave apropriadas a uma proposta INCO-DEV ao Quinto Programa-Quadro poderiam ser as seguintes:



Em relação à **América Latina** destaca-se a problemática do planeamento dos escassos recursos hídricos do Nordeste brasileiro. Realça-se a apresentação de um programa de aproveitamento de águas subterrâneas do Nordeste brasileiro feita no 2º SILUSBA, realizado no Recife, em Novembro de 1995, em simultâneo com o XI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, co-organizado pela Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH) e pela Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos (APRH). O tema central deste Simpósio foi precisamente *Desenvolvimento Sustentável dos Recursos Hídricos*. No Volume 2 do Simpósio, intitulado **Águas Subterrâneas,** abordaram-se os seguintes sub-temas:

- a água como factor de desenvolvimento em regiões semi-áridas;
- águas subterrâneas;
- **vulnerabilidade e protecção de águas subterrâneas.**

Dos Anais do 2º SILUSBA destacam-se as recomendações de COSTA e COSTA FILHO (1995) para um **Programa de Aproveitamento das Águas Subterrâneas no Semi-Árido Nordestino:**

O programa para aproveitamento adequado das águas subterrâneas no semi-árido nordestino, envolverá, dentre outras, as seguintes acções:

- *cadastramento de todas as obras de captação;*
- ***realização de estudos hidrogeológicos a nível de detalhe, visando avaliar precisamente as reservas e recursos exploráveis;***
- *recuperação de poços abandonados, com instalação, quando for necessário, de equipamento de dessalinização da água;*
- *monitoramento da exploração dos aqüíferos visando a sua proteção e preservação e quantitativa;*
- *perfuração de poços profundos em bacias sedimentares e aqüífero físsural e poços*

depósitos sedimentares de pouca espessura;

- *realização de estudos e posterior implantação onde recomendável, de barragens subterrâneas e de barragens de assoreamento;*
- *desenvolvimento de campanhas de esclarecimento público acerca da correta utilização das águas subterrâneas, evitando desperdícios e depreciação de aqüíferos;*
- *implantação de leis que assegurem o controle do uso e conservação dos mananciais subterrâneos;*
- ***zoneamento qualitativo e quantitativo dos aqüíferos; e***
- ***planejamento do uso racional dos recursos hídricos subterrâneos.***

3. CONCEPÇÃO DO PLANO DE ESTUDOS SOBRE RECURSOS HÍDICOS SUBTERRÂNEOS

Procurando contribuir para minorar as carências de investigação acabadas de sintetizar, correspondentes às grandes áreas globais de águas subterrâneas cujos temas foram seleccionados para títulos dos Capítulos Segundo ao Quinto (*i.e.* **recarga** de aquíferos, **vulnerabilidade à poluição, monitorização** de águas subterrâneas, **protecção** e **reabilitação** de aquíferos e **gestão optimizada** de águas subterrâneas), propõe-se neste Capítulo Nono *um plano de estudos relativo a alguns desses problemas,* citando *a metodologia proposta, o planeamento dos meios necessários, os objectivos a atingir e os benefícios operados da sua realização.*

O plano de estudos foi dividido em três grandes partes:

PARTE 1: Projectos de Investigação a desenvolver em **Portugal,**

PARTE 2: Projectos de Investigação a desenvolver em parceria na **Europa**

PARTE 3: Projectos de Investigação a desenvolver em parceria no resto do **Mundo**

PARTE 1 - INVESTIGAÇÃO EM PORTUGAL: PLANO DE ESTUDOS PROPOSTO

Investigação sobre Recarga de Águas Subterrâneas:

1. **Programa de Investigação P1**- *Estudos de calibração de métodos de avaliação da recarga regional de aquíferos e de outras regiões de interesse hidrogeológico*
2. **Programa de Investigação P2** - *Ensaios de laboratório e modelação matemática da infiltração e do escoamento, na zona vadosa e na zona saturada*

Investigação sobre Vulnerabilidade à Poluição de Águas Subterrâneas:

3. **Programa de Investigação P3-SADCC** - *Validação e verificação do desempenho de modelos de avaliação da vulnerabilidade à poluição de águas subterrâneas* (a desenvolver em Portugal e em países do sul de África)

Investigação sobre Monitorização de Águas Subterrâneas:

4. **Programa de Investigação P4** - *Monitorização de águas subterrâneas em antigas lixeiras e em novos aterros sanitários*

Investigação sobre Protecção de Águas Subterrâneas:

5. **Programa de Investigação P5** - *Zonamento e mapeamento automático de perímetros de protecção de captações de águas subterrâneas*

Investigação sobre Qualidade e Reabilitação de Águas Subterrâneas:

6. **Programa de Investigação P6** - *Desnitrificação in situ de aquíferos poluídos por nitratos*
7. **Programa de Investigação P7** - *Interacção qualitativa águas superficiais - águas subterrâneas*

Investigação sobre Optimização e Gestão de Águas Subterrâneas:

8. **Programa de Investigação P8** - *Simulação, optimização e gestão de sistemas aquíferos sujeitos a intrusão salina*

PARTE 2 - INVESTIGAÇÃO NA EUROPA: PLANO DE ESTUDOS PROPOSTO

Países da União Europeia:

9. **Acção Concertada de Investigação P9-AC1** - COST: *The Future of Water in Europe*

Rússia:

10. **Programa de Investigação P10-INTAS** - *Methods of groundwater vulnerability assessment and mapping in case of massive and local chemical and radioactive contamination*

PARTE 3 - INVESTIGAÇÃO NO RESTO DO MUNDO: PLANO DE ESTUDOS PROPOSTO

Países de África: Mediterrânicos, PALOP e África do SUL

11. **Programa de Investigação P11** - *Desenvolvimento de metodologias para avaliação de recursos e riscos hidrogeológicos de ilhas atlânticas*
12. **Programa de Investigação P8-MEDEA**: *MEDiterranean Environment Aquifers Sustainable management of coastal freshwater resources under socio-economic (urbanisation, tourism) development and climate scenarios*
13. **Programa de Investigação P3-SADCC:** *Validação e verificação do desempenho de modelos de avaliação da vulnerabilidade à poluição de águas subterrâneas: Aplicação a países da UE e da SADCC*

Países da América Latina: Brasil e Chile

14. **Programa de Investigação P1+P10-Brasil** - *Estudos de calibração de métodos de avaliação da recarga regional de aquíferos e optimização da exploração de águas subterrâneas: Aplicação ao Nordeste Brasileiro*

15. **Programa de Investigação P7-MERCOSUR** - *Interacção águas superficiais-águas subterrâneas. Estudo de alternativas de tratamento de solos e de águas subterrâneas contaminados por metais pesados. Ensaios de laboratório e implementação numa área contaminada*

Países da Ásia: ASEM

16. **Programa de Investigação P6-China:** - *In situ rehabilitation of polluted aquifers. Optimisation of methodologies*
17. **Acção Concertada de Investigação P12-AC2 - ASEM:** ***BINGO 2000*** - *An EU-ASEM Concerted Action on measuring, monitoring and managing sustainability: the groundwater & coastal zones dimensions*

Neste Capítulo Nono apresenta-se a parte não-confidencial destes Projectos de Investigação e Acções Concertadas de Investigação, *i.e.* apresenta-se todo o conteúdo científico e exclui-se a componente "*administrativa*" como o nome dos potenciais clientes, os custos, a distribuição de pessoas-mês e os calendários, que se desenvolverão de 2000 a 2007.

4. PARTE I - INVESTIGAÇÃO EM PORTUGAL

4.1 Investigação sobre Recarga de Aquíferos

4.1.1 Programa de Investigação P1 - Estudos de calibração de métodos de avaliação da recarga regional de aquíferos e de outras regiões de interesse hidrogeológico

4.1.1.1 Objectivos

No Capítulo Segundo são apresentados vários processos para determinar o valor da recarga de aquíferos. Destes, são aqui retomados aqueles que permitem a estimativa da recarga por episódio de precipitação: (1) o modelo de balanço hídrico sequencial diário a nível do solo (BALSEQ e a sua actualização: BALSEQ_M); (2) o método da decomposição dos hidrogramas de escoamento; e (3) o método da oscilação de níveis piezométricos.

Pretende-se fazer uma calibração do modelo BALSEQ_M no que diz respeito à separação do escoamento total em escoamento superficial e escoamento subterrâneo. Essa calibração será feita por comparação dos resultados dados pelo BALSEQ_M com os resultados dados por outros métodos. Em função dos resultados das comparações realizadas, eventualmente poderá ser necessário introduzir novas particularidades no modelo BALSEQ_M.

Em OLIVEIRA *et al.* (1997a), fez-se uma primeira comparação entre os resultados dados pelo modelo BALSEQ_M e os resultados da aplicação do método da decomposição do escoamento

total, tendo esta comparação sido feita com base em valores anuais médios, em valores anuais e em valores mensais de recarga. Pretende-se agora aprofundar esta análise para uma comparação, conceptualmente mais correcta, entre os valores de recarga por episódio de precipitação. Pretende-se também fazer um tipo de análise semelhante entre os valores dados pelo método da oscilação dos níveis piezométricos e os do BALSEQ_M. Esta análise de valores será iterativa com a calibração dos modelos, até que se obtenham valores concordantes.

Por outro lado, pretende-se verificar quais são os métodos que melhor se adequam às diferentes situações hidrogeológicas possíveis, tendo em vista as suas particularidades e a informação de base existente (por exemplo sistemas de porosidade intergranular, sistemas cársicos, meios fissurados, recarga em aquíferos semiconfinados).

Tendo-se desenvolvido e calibrado diversos métodos para a estimativa da recarga, pretende-se, como grande objectivo deste Projecto, quer seja a partir da extrapolação espacial dos resultados dados pelos modelos de balanço hídrico, quer seja pela extrapolação espacial dos resultados obtidos pelo método da decomposição dos hidrogramas, quer seja pelo conhecimento adquirido pela aplicação de outros métodos, obter um mapa dos **recursos hídricos subterrâneos renováveis disponíveis interanualmente.**

4.1.1.2 Revisão do Estado Actual de Conhecimentos

A determinação da recarga de aquíferos constitui um dos passos mais importantes da caracterização hidrogeológica. A recarga corresponde à renovação das reservas hídricas subterrâneas. Se um aquífero estiver a ser correctamente explorado, a sua recarga natural compensa as extracções, evitando que as reservas de água subterrânea diminuam ao longo do tempo, e impedindo que chegue, eventualmente, ao esgotamento. A recarga de aquíferos constitui também uma importante via de transporte de eventuais poluentes existentes na zona não-saturada do solo, originados por múltiplas actividades humanas, quer a nível agrícola quer industrial e mesmo doméstica. Valores significativos de recarga podem, por outro lado, favorecer a diluição de concentrações elevadas de produtos ou elementos nocivos, resultantes de processos poluentes anteriores.

No Capítulo Segundo são apresentados vários processos para determinar o valor da recarga de aquíferos. Estes métodos foram também abordados em OLIVEIRA e LOBO-FERREIRA (1994) que, para além disso, analisam valores de recarga estimados em diversos trabalhos de especialidade. Dos métodos apresentados no Capítulo Segundo são aqui retomados três que permitem a estimativa da recarga por episódio de precipitação: (1) o modelo de balanço hídrico sequencial diário a nível do solo (BALSEQ); (2) o método da decomposição dos hidrogramas de escoamento; e (3) o método da oscilação de níveis piezométricos.

Muitas vezes e por motivo das diferentes situações hidrogeológicas existentes, os diferentes métodos para a estimativa da recarga são aplicados isoladamente, não sendo possível comparar resultados obtidos por métodos diferentes para uma mesma área, e como tal, fazer uma validação dos seus resultados.

Dos três métodos referidos, é o programado no modelo BALSEQ aquele que terá maior facilidade de aplicação, no sentido em que é o único em que os dados de entrada do modelo se encontram normalmente disponíveis ou podem ser derivados.

O modelo BALSEQ baseia-se em fórmulas empíricas derivadas pelo *United States Soil Conservation Service* para os EUA. Estas fórmulas foram derivadas para determinar caudais

de ponta de cheia (escoamento directo) e não especificamente para determinar o escoamento subterrâneo.

Sendo o modelo BALSEQ um modelo de balanço a nível do solo, não entrando em consideração com a capacidade de armazenamento do aquífero, os valores de recarga por ele gerados representam uma recarga potencial. Esta recarga potencial só estará disponível se houver espaço no aquífero para conter essa água. No âmbito dos trabalhos do Protocolo entre o INAG e o LNEC, terminado em 1997, introduziu-se um conjunto de complementos ao modelo BALSEQ, com o objectivo de considerar a capacidade de armazenamento do aquífero (*cf.* OLIVEIRA *et al.*, 1997a). Ao novo modelo deu-se a designação de BALSEQ_M.

Também no âmbito do mesmo Protocolo desenvolveu-se o método da decomposição do hidrograma de escoamento total medido em secções de bacias hidrográficas e o método da análise da recarga pela oscilação dos níveis piezométricos. Estes métodos foram aplicados a diversos casos de estudo (*cf.* OLIVEIRA *et al.*, 1997a).

Finalmente, no âmbito dos trabalhos desenvolvidos pela equipa do LNEC.DH.GIAS para o plano de bacia do Tejo, fez-se uma aplicação de diferentes métodos para estimativa da recarga em função das condições hidrogeológicas do meio.

4.1.1.3 Programa de Trabalhos

Fase 1: *Calibração/Actualização dos modelos que permitem o cálculo da recarga por episódio de precipitação*

Esta é uma fase que se desenvolve em dois níveis iterativos:

A) pela comparação dos resultados dados por dois métodos distintos, com a actualização dos parâmetros desses dois métodos até que dêem resultados semelhantes. Os métodos a usar serão preferencialmente três:

- balanço hídrico sequencial diário;
- decomposição dos hidrogramas de escoamento total medidos em secções de bacias hidrográficas;
- análise da variação de níveis piezométricos.

B) no caso do primeiro nível iterativo não resultar, pela introdução de alterações aos próprios métodos, por exemplo novas variáveis, que permitam contemplar situações não consideradas. Após este processo, volta-se ao primeiro nível iterativo.

Para a elaboração da 1ª Fase, consideram-se as seguintes sub-fases:

1.1 - Selecção das áreas para as quais é possível pelo menos correr dois modelos, ou seja onde haja disponibilidade de dados;

1.2 - Recolha e tratamento dos dados:

a) método do balanço hídrico sequencial diário: precipitação diária, evapotranspiração mensal, número característico de escoamento e capacidade utilizável do solo;

b) decomposição dos hidrogramas de escoamento total medidos em secções de bacias hidrográficas: precipitação diária e escoamento total diário;

c) análise da variação de níveis piezométricos: precipitação diária, registos diários de níveis piezométricos, porosidade eficaz na zona de oscilação dos níveis;

1.3 - Corrida dos modelos;

1.4 - Comparação dos valores entre modelos;

1.5 - Se necessário, alterar parâmetros estimados e voltar à sub-fase 1.3;

1.6 - Se necessário, fazer alterações na concepção dos modelos e voltar à sub-fase 1.3.

Fase 2: *Mapeamento dos recursos hídricos subterrâneos renováveis disponíveis interanualmente*

Após a finalização da Fase 1, pretende-se conseguir a calibração dos métodos de recarga para os casos de estudo e com isto obter uma maior segurança quanto aos resultados fornecidos por estes métodos.

Assim, esta fase consiste no desenvolvimento de metodologias expeditas que permitam fazer a caracterização espacial da recarga, permitindo o seu cálculo a partir da existência de informação de base. O resultado final será a elaboração de um mapa de recursos hídricos subterrâneos renováveis disponíveis interanualmente. Este mapa deverá também incluir os valores de recarga obtidos mediante estudos desenvolvidos localmente e utilizando outros métodos.

Consideram-se as seguintes sub-fases:

2.1 Desenvolvimento de métodos práticos para a estimativa da recarga média anual, com base nos resultados obtidos pela aplicação dos métodos validados na Fase 1 a diferentes situações. Os métodos práticos relacionam a recarga média com a precipitação média. Os valores médios são anuais ou, eventualmente, mensais. Procurar-se-á também relacionar os valores anuais e mensais (não médios). Estes valores são, para todos os efeitos, considerados a nível regional.

Por exemplo, se o método prático se basear na regionalização dos resultados da aplicação do modelo BALSEQ, far-se-á em primeiro lugar corridas deste modelo utilizando dados de precipitação diária em séries de 30 ou mais anos, provenientes de várias estações distribuídas espacialmente em Portugal. No mínimo pretende-se considerar 12 estações completas. Através da correlação entre as diversas variáveis deste modelo que condicionam a recarga procuram-se relações finais entre a recarga e a precipitação, que podem depender, para além das diversas variáveis intrínsecas ao processo de recarga, da zona do País tendo em vista que o regime de precipitação varia geograficamente. Essas variáveis intrínsecas são, para o actual modelo conceptual do BALSEQ: precipitação, evapotranspiração potencial, quantidade máxima de água disponível para evapotranspiração, humidade do solo, número característico de escoamento, e, para uma eventual adaptação do modelo, dependente da sua calibração na Fase 1, parâmetros relacionados com a capacidade de armazenamento do aquífero, ou outros parâmetros que se definam.

2.2 Recolha de informação de base espacial necessária para aplicar as metodologias expeditas para cálculo da recarga:

a) mapas de variáveis climatológicas (mapa de distribuição da precipitação, mapa de evapotranspiração potencial);

b) mapas de caracterização do meio (por exemplo mapa de ocupação do solo, mapa de solos, mapa geológico, ou outros mapas com a informação necessária que se tenha entretanto definido durante a Fase 1);

Aplicação das metodologias expeditas e elaboração do mapa de recursos hídricos subterrâneos renováveis disponíveis interanualmente.

Fase 3: *Divulgação dos resultados obtidos e elaboração de relatórios*

Após a finalização de cada Fase será apresentado um relatório final dessa Fase. Os resultados obtidos serão alvo de pelo menos duas comunicações e/ou publicações em revistas da especialidade.

4.1.2 Programa de Investigação P2 - Ensaios de laboratório e modelação matemática da infiltração e do escoamento, na zona vadosa e na zona saturada

4.1.2.1 Enquadramento

No ciclo da água, a infiltração corresponde ao volume hídrico que após a precipitação penetra no solo. Esta água pode depois ficar armazenada, evapotranspirar, ou escoar no solo, continuando por uma zona não-saturada, até atingir a zona saturada. Aí pode ficar armazenada ou escoar podendo mais tarde aflorar à superfície.

O processo de infiltração e escoamento sub-superficial constitui a componente subterrânea do ciclo da água e é responsável pela recarga dos aquíferos, cuja exploração fornece água para diversos fins (consumo humano, utilização na indústria, rega). É igualmente o processo de infiltração que fornece aos solos a água necessária ao desenvolvimento das plantas. Por outro lado, a água que precipita mas não é infiltrada constitui o escoamento superficial que pode provocar cheias.

A infiltração através da zona não-saturada depende das propriedades do material onde ocorre (porosidade, porosidade eficaz, retenção específica, permeabilidade, teor de humidade), da intensidade da precipitação e do seu valor, da evaporação na sua parte mais superficial e da transpiração na zona das raízes das plantas no caso de estas existirem.

No percurso através da zona não-saturada, uma partícula de água move-se devido a um conjunto de pressões que sobre ela actua cujos valores são função dos factores referidos.

Pretende-se neste Projecto desenvolver campos experimentais onde se possa estudar o escoamento vertical da água por acção da gravidade e verificar o efeito que a variação das características do meio tem na propagação da humidade. Os campos experimentais, a instalar na **Estação Agronómica de Coruche** e no **LNEC** serão equipados com simulador de precipitação, dispositivos de medição de humidade, de tensão capilar, de potencial hidráulico, de temperatura e de volumes de água infiltrada e escorrida superficialmente. A possibilidade de simular episódios sucessivos de precipitação permite recriar situações complexas que traduzam situações reais.

A medição das diversas grandezas referidas permitirá a confirmação ou o estabelecimento de novas leis que permitam a modelação matemática da infiltração e do escoamento de água na **zona não-saturada.**

O actual estudo sobre infiltração insere-se no âmbito de um trabalho mais abrangente e que visa a determinação da **recarga de aquíferos.**

4.1.2.2 Objectivos do Projecto

Com este Projecto pretende-se:

- ganhar conhecimentos e experiência na construção de campos experimentais para estudo da infiltração e do escoamento;

- estudar o processo de infiltração e do escoamento na zona não-saturada ou periodicamente saturada, em dois campos experimentais cujos materiais apresentem características de porosidade e de granulometria distintas;
- estudar, num campo experimental, o efeito de drenância através de uma camada menos permeável entre duas formações de porosidade intergranular;
- estudar velocidades e capacidades de infiltração nos casos apresentados;
- verificar experimentalmente as leis para o escoamento nesta zona, através da compreensão do processo de infiltração em função do teor de humidade do meio e da precipitação, para as características hidráulicas do material utilizado;
- modelar matematicamente o escoamento na zona não-saturada;
- fazer o balanço hídrico entre a precipitação, a infiltração, a evaporação, a humidade no solo, o escoamento superficial e o escoamento profundo.

4.1.2.3 Revisão do Estado Actual de Conhecimentos

Aprofunda-se a revisão apresentada no Capítulo Segundo com um breve revisão específica dos aspectos essenciais ao estudo da **zona não-saturada** do solo.

O escoamento na zona não-saturada tem sido um campo de investigação muito interessante. A necessidade de compreender este fenómeno tem em vista os processos de recarga e de contaminação de aquíferos, na domínio da hidrogeologia, a produção de cheias no caso da hidrologia de superfície, o teor de água no solo, no caso da agronomia.

A formulação matemática do escoamento neste meio pode ser dada pela lei de Richard que é a resolução da equação da continuidade do escoamento em meios porosos pressupondo fluxo obedecendo à lei de Darcy mas onde a condutividade hidráulica depende do teor em humidade do material por onde a água circula.

Têm sido desenvolvidos diversos instrumentos (infiltrómetros, portáteis ou estáticos, lisímetros) que permitem o estudo dos fenómenos de infiltração, escoamento superficial e evapotranspiração através de medição *in situ* ou em laboratório (ABOUKHALED *et al.*, 1982, BHARDWAJ e SINGH, 1992; KHAN *et al.*, 1993). Estes fenómenos são condicionados por diversos parâmetros que são, para além dos parâmetros intrínsecos ao meio (aproximadamente constantes), o teor de água, a sucção e a condutividade hidráulica. A sucção do solo pode ser medida por tensiómetros para sucções até 1 bar. A humidade do solo pode ser medida por reflectometria (TOPP *et al.*, 1983; TOPP e DAVIS, 1985) ou por sondas de neutrões. SALEHZADEH e DEMOND (1994) apresentam um aparelho para medir a sucção e a condutividade hidráulica em amostras de solo. PARKIN *et al.* (1995) utilizam a reflectometria para medir a condutividade hidráulica *in situ* ou em laboratório.

A modelação do escoamento tem sido estudada por diversos autores. CORRADINI *et al.* (1994) apresentam soluções analíticas para calcular a infiltração durante episódios de precipitação consecutivos, com o cálculo da redistribuição do teor de humidade ao longo do tempo. NARASIMHAN (1989) e RATHFELDER e ABRIOLA (1994) apresentam soluções numéricas da equação de Richard.

A infiltração é dada pela seguinte expressão:

Infiltração = Precipitação - Volume retido à superfície - Escoamento superficial

Durante um episódio de precipitação, a água começa por preencher o armazenamento por retenção de superfície. Após a satisfação deste armazenamento, a água da chuva infiltra-se (EAGLESON, 1978). A infiltração depende da capacidade de infiltração do solo. Esta vai diminuindo com o decorrer do tempo devido à água já infiltrada e o consequente aumento no teor de humidade no solo mas enquanto não se atingir a saturação a taxa de infiltração é igual à taxa de precipitação. Quando é atingida a saturação da superfície começa-se a formar escoamento superficial e a taxa de infiltração vai diminuindo com o tempo (EAGLESON, 1978), até chegar a um valor mínimo que é aproximadamente o da condutividade hidráulica saturada do material (RUBIN *et al.*, 1963 e 1964 *in* FREEZE e CHERRY, 1979). Uma fórmula para descrever a taxa de infiltração é a de Philip retomada por outros autores (por exemplo por EAGLESON, 1978).

A modelação do escoamento profundo pode ser feita pelo balanço hídrico. O escoamento profundo é a água que se infiltra à superfície e que não é evaporada ou transpirada. A aplicação ao caso em estudo simplifica-se para a expressão seguinte:

Precipitação = Escoamento profundo + Escoamento superficial + Evapotranspiração + Variação de água armazenada no material

Entre os métodos disponíveis para modelar estes aspectos, encontram-se os métodos de balanço hídrico sequencial (*cf.* Capítulo Segundo).

4.1.2.4 Programa de Trabalhos

O Projecto, que visa estudar o processo de infiltração e escoamento na zona não-saturada mediante ensaios de laboratório, caracteriza-se fundamentalmente por quatro tarefas:

1. a construção dos campos experimentais;
2. a realização de ensaios nos campos experimentais;
3. a modelação matemática dos resultados obtidos;
4. a divulgação dos resultados.

De forma a verificar a dependência do escoamento em relação ao material onde este se processa pretende-se construir/instalar três campos experimentais. Os campos experimentais serão equipados com simulador de precipitação, dispositivos de medição de humidade, de tensão capilar, de potencial hidráulico, de temperatura e de volumes de água infiltrada e escorrida superficialmente. A possibilidade de simular episódios sucessivos de precipitação permite reproduzir situações complexas que traduzam situações reais.

Litologicamente, o material utilizado para estudar o escoamento nos primeiros dois campos experimentais é de natureza detrítica não consolidada possuindo granulometrias e porosidades diferentes. No terceiro campo experimental pretende-se estudar a drenância entre dois materiais com as mesmas características através de um material menos permeável.

A construção dos três campos experimentais será desfasada no tempo. Pretende-se construir o primeiro campo numa área do LNEC.DH, por exemplo no *aquífero artificial*, realizar ensaios e só após a experiência adquirida na construção e ensaios deste campo se procederá à construção dos outros dois campos, o segundo na **Estação Agronómica Nacional em Coruche**, e o terceiro em princípio, por substituição do primeiro. A construção desfasada dos campos experimentais permite introduzir algumas alterações que se achem convenientes e que possam melhorar a realização dos ensaios.

Em cada um dos campos realizar-se-ão diferentes tipos de ensaios. Os mais importantes serão a simulação de chuvadas de diferentes intensidades e com diferentes períodos de ausência de chuva, com observação em profundidade e no tempo da evolução do teor de humidade e da tensão capilar no material. Estas observações permitem obter dados de entrada para modelos de escoamento e de infiltração da zona não-saturada, que se pretendem fazer em seguida. Ao mesmo tempo pode-se estudar os efeitos do vento que, conjuntamente com as variações naturais da temperatura, modificará as condições de evaporação. Para cada campo experimental, este tipo de ensaios será acompanhado pela modelação matemática dos fenómenos que decorrem nos ensaios. Durante o 2º e 3º anos do Projecto, divulgar-se-ão os resultados através da publicação de artigos e de comunicações em encontros da especialidade.

O programa de trabalhos desenvolver-se-á nas seguintes fases:

1) Primeiro campo experimental:
   1.1) planeamento, aquisição de material e construção do campo experimental;
   1.2) realização de ensaios no campo experimental;
   1.3) modelação matemática da infiltração e do escoamento.
2) Segundo campo experimental:
   2.1) planeamento, aquisição de material e implantação do campo experimental;
   2.2) realização de ensaios nos campos experimentais;
   2.3) modelação matemática da infiltração e do escoamento.
3) Terceiro campo experimental:
   3.1) planeamento, aquisição de material e construção do campo experimental;
   3.2) realização de ensaios nos campos experimentais;
   3.3) modelação matemática da infiltração e do escoamento.
4) Acções de divulgação dos resultados do Projecto e elaboração de relatórios.

4.2 Investigação sobre Vulnerabilidade à Poluição de Águas Subterrâneas

4.2.1 Programa de Investigação P3 - SADCC: Validação e verificação do desempenho de modelos de avaliação da vulnerabilidade à poluição de águas subterrâneas: Aplicação a países da UE e da SADCC

No Capítulo Segundo concluiu-se ser importante o desenvolvimento de estudos de calibração dos métodos de avaliação da vulnerabilidade à poluição de aquíferos, nomeadamente do método DRASTIC, para permitir a comparação dos seus resultados quantitativos (*i.e.* em termos de valor do índice) e qualificativos (*i.e.* qualificando as classes de vulnerabilidade em termos de "*muito elevada*", "*elevada*", "*média*", "*baixa*" e/ou "*muito baixa*") com os resultados da campanha de análises da qualidade de água dos sistemas aquíferos de Portugal, *e.g.* do Baixo Tejo e Sado monitorizados pelo LNEC para o Instituto da Água no âmbito dos estudos desenvolvidos para o Plano de Bacia do rio Tejo, durante Outubro e Novembro de 1998 (*cf.* LOBO-FERREIRA *et al.* 1999). E concluiu-se ainda, ser importante a comparação desses resultados quantitativos e qualificativos com os obtidos por outras técnicas das quais se salienta a *Geofísica na Detecção e Parametrização de Aquíferos*, por exemplo, comparando os resultados apresentados por GONÇALVES e ANDRADE AFONSO (1998) no seu estudo "*Geofísica na Protecção dos Recursos Hídricos. Mapeamento de Zonas de Risco no Vale do Tejo-Sado Recorrendo a Prospecção Geoeléctrica*" (onde os autores desenvolvem uma análise das zonas mais ou menos permeáveis no Vale do Tejo interpretando levantamentos geoeléctricos) com os resultados apresentadas pelo autor ao 4º Congresso da Água (*cf.* LOBO-FERREIRA, 1998) na comunicação "*Vulnerabilidade à poluição de águas subterrâneas: Fundamentos e conceitos para uma melhor gestão e protecção dos aquíferos de Portugal*".

O Programa de Investigação P3 - **Validação e verificação do desempenho de modelos de avaliação da vulnerabilidade à poluição de águas subterrâneas** - foi escrito para dar resposta a esses desafios.

Na sequência de anteriores projectos sobre o tema Vulnerabilidade de Aquíferos, co-financiados por fundos comunitários (DGXI e Fundo de Coesão, *cf.* Capítulo Segundo) procurou-se aumentar as possibilidades de financiamento da proposta pelo novos fundos comunitários e/ou por verbas do Quinto Programa-Quadro (DGXII - Programa INCO-DEV). Pensou-se, assim, apropriado desenvolver a proposta do Programa P3 tendo em vista parceria europeia (*British Geological Survey*, Reino Unido) e de outros países do Sul de África, eventualmente Moçambique (Universidade Eduardo Mondlane) e Angola (Universidade Agostinho Neto e Direcção Nacional de Águas) e seguramente África do Sul (*Council for Scientific and Industrial Research, CSIR*). O autor já estabeleceu contactos com as referidas instituições de investigação e universitárias desses quatro países, visando a elaboração desta proposta. A proposta foi escrita directamente em língua inglesa sendo apresentada na Parte 3 - *Investigação no Resto do Mundo*, secção "*Países de África: PALOP e África do SUL*".

4.3 Investigação sobre Monitorização de Águas Subterrâneas

4.3.1 Programa de Investigação P4 - Monitorização de águas subterrâneas em antigas lixeiras e em novos aterros sanitários

4.3.1.1 Enquadramento

Em 1997, foram inventariadas 340 lixeiras em Portugal Continental. Essas lixeiras foram o destino final dos **resíduos sólidos urbanos** (RSU) produzidos no País e constituíram, em diversos casos, também o destino de muitos dos **resíduos industriais** perigosos e não perigosos produzidos (MA, 1998).

Face a esta situação, o Ministério do Ambiente estabeleceu como uma das suas linhas prioritárias de actuação o encerramento das referidas lixeiras e a construção de infra-estruturas de tratamento e confinamento de RSU. No final do ano de 2000, o número de lixeiras activas não deverá ultrapassar as duas dezenas, servindo menos de 5% da produção de RSU no continente (MA, 1998).

A construção de novas infra-estruturas permitiu atingir 63% da população servida com destino final adequado em finais de Novembro de 1998, valor que se prevê atingir 92% da população em final de 2000 (MA, 1998).

Conclui-se do exposto, que a deposição de resíduos sólidos urbanos em Portugal não contemplou, até à década de 90, a adequada protecção do solo e das águas subterrâneas. O encerramento das lixeiras é um passo de grande relevância que, por um lado, vem pôr fim à deposição de resíduos em locais não adequados e, por outro, vem diminuir a produção do lixiviado na zona da lixeira. Contudo, **a produção do lixiviado continua a existir nestes sistemas** como resultado dos processos de decomposição dos resíduos aí presentes.

Nos novos aterros sanitários, a protecção dos solos e águas subterrâneas é um dos aspectos fundamentais considerados. Os materiais que revestem inferior e lateralmente o aterro, sejam eles barreiras geológicas naturais ou qualquer outro tipo de revestimentos, devem, por isso, cumprir valores regulamentares relativamente à espessura e à permeabilidade (UE, 1997). Importa monitorizar a evolução da qualidade das águas subterrâneas nas zonas envolventes dos novos aterros por forma a certificar o bom funcionamento dos sistemas e a detectar atempadamente eventuais fugas e a tomar medidas de contenção/reabilitação adequadas.

4.3.1.2 Objectivo do Projecto

A existência de diversas lixeiras no nosso País onde diariamente são produzidos lixiviados, cujo teor de poluição se desconhece ao certo, necessita que se faça um investimento a nível nacional para a caracterização desta situação. A presença deste tipo de infra-estruturas constitui, por si só, um factor de risco grave de poluição para os solos e para as águas subterrâneas das zonas envolventes, em especial quando estas se localizam em zonas com elevada vulnerabilidade das águas subterrâneas à poluição.

O objectivo deste programa centra-se na caracterização do risco real apresentado por depósitos de RSU no nosso País, face a diferentes situações geológicas, topográficas, climatéricas e para diferentes estádios de evolução (anos de funcionamento) de lixeiras e

aterros. Será **calculado o risco absoluto e relativo que apresentam este tipo de infra-estruturas para o ambiente, quais os tipos de poluentes a elas associado, a extensão da poluição e os principais processos de contenção/reabilitação a considerar.**

4.3.1.3 Benefícios a Alcançar

O principal benefício de um projecto desta natureza é quantificar o grau e a extensão de um problema de poluição cujos efeitos apenas se conhecem em casos isolados. Com este conhecimento será possível dar consistência ao cumprimento da legislação e dos critérios impostos pela UE, onde ***prevenir, proteger, reabilitar*** são os três aspectos fundamentais da gestão e protecção dos recursos hídricos subterrâneos.

4.3.1.4 Programa de Trabalhos

O desenvolvimento deste projecto só será possível com a contribuição de diversas entidades, das quais se destacam o Instituto dos Resíduos (INR) e a Empresa Geral de Fomento (entidade gestora dos sistemas de RSU multimunicipais). Pretende-se tirar partido e fomentar novas sinergias para a realização deste projecto, nomeadamente através do aproveitamento de análises químicas de águas subterrâneas, em curso nos novos aterros sanitários.

Na inviabilidade de estudar todas as zonas envolventes de lixeiras, individualmente, será seleccionado um conjunto de áreas representativas das diversas situações encontradas no País.

Serão caracterizados os seguintes aspectos:

- principais tipos de poluentes do lixiviado (em colaboração com o INR);
- principais poluentes presentes nas águas subterrâneas de zonas envolventes de depósitos de RSU;
- evolução da qualidade das águas subterrâneas ao longo do tempo;
- efeito da diminuição da infiltração na diminuição da produção de lixiviado em lixeiras;
- extensão das manchas de poluição nas zonas envolventes;
- as principais medidas de contenção e/ou reabilitação tendo em vista a protecção das águas subterrâneas da zona envolvente.

A análise dos diferentes aspectos da lixiviação de poluentes referidos será efectuada em duas infra-estruturas diferentes: as antigas lixeiras e os actuais aterros de RSU. Será adoptado o seguinte plano de trabalhos:

A - SELECÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO

1. Selecção das áreas de estudo (6 em lixeiras e 2 em aterros) representativas de quatro tipos de meio geológicos: arenoso, argiloso, granítico, xistoso;

Para as áreas de aterro poderão ser utilizados, caso se chegue a um consenso, as infra-estruturas recentemente instaladas nos aterros multimunicipais da Figueira da Foz, de Vila Nova de Gaia e/ou do Sotavento, respectivamente para os meios arenoso, granítico e xistoso.

Será dada prioridade de selecção aos locais onde já existam infra-estruturas de monitorização. Não é de excluir a necessidade de se realizarem novos furos complementares.

B - ANÁLISE DO HISTORIAL DO LOCAL (em colaboração com o INR)

2. Data de entrada em funcionamento e estádio actual;
3. Caracterização do tipo de infra-estrutura e dos eventuais processos de isolamento existentes sob a deposição em aterro;
4. Caracterização do tipo de resíduos depositados no local e da sua eventual alteração no tempo;
5. Caracterização da composição média do lixiviado (tipo e concentração de poluentes).

C - CARACTERIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES DO LOCAL

6. Análise de estudos anteriores sobre o local;
7. Análise das infra-estruturas existentes (sondagens, furos, etc.);
8. Caracterização geológica do local;
9. Caracterização hidrogeológica do local;
10. Caracterização da precipitação, ETR e infiltração.

D - MONITORIZAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DO LOCAL

11. Selecção de, pelo menos, três furos de monitorização em cada local de estudo e um furo na vizinhança do local cujas características de qualidade servirão de referência (3 furos x 8 locais = 24 furos + 8 furos);
12. Registo semestral dos níveis piezométricos nos furos;
13. Recolha de amostras de águas subterrâneas para análise dos parâmetros de qualidade. A amostragem será efectuada, pelo menos, semestralmente, durante 2 anos para os 24 furos e uma vez para o furo de referência. Sempre que haja variações significativas em qualquer parâmetro a frequência poderá ser alterada;

A amostragem será efectuada por forma a recolher uma amostra única representativa da água do furo. Para isso será extraída continuamente água do furo através de uma bomba para se analisar, no local, os parâmetros condutividade, temperatura e pH da água que vai sendo extraída do furo (ALLER *et al.*, 1989). A água será extraída até que haja estabilização dos valores dos parâmetros referidos, o que geralmente corresponde a três volumes da água que ocupa a zona saturada no furo (CLARK, 1992). Quando este equilíbrio é atingido considera-se que as amostras são representativas da qualidade da água do local. Nessa altura, o caudal de bombagem será gradualmente diminuído até se atingir a velocidade própria para amostragem (entre 0,1 e 0,5 l/min).

O tipo de análises químicas a realizar será definido com base na composição dos lixiviados e da qualidade inicial das águas subterrâneas da região. Será feita uma análise da qualidade das águas da região em furos afastados cujas águas permitam servir de valor inicial de referência.

Independentemente do tipo de lixiviado produzido haverá um conjunto de parâmetros que serão sempre analisados (Tabela P4-I).

Tabela P4-I - Parâmetros mínimos a analisar

Parâmetros a medir *in situ*	Parâmetros para análises químicas	
Temperatura	Cloretos	Arsénio
pH	Sulfatos	Cádmio
Potencial redox	Bicarbonato	Chumbo
Condutividade eléctrica	Fosfatos	Cianeto
Oxigénio dissolvido	Nitratos	Cobre
	Azoto amoniacal	Crómio
	Fluoretos	Ferro
	Fenóis	Mercúrio
	Carbono Orgânico Total	Níquel
	Sódio	Zinco
	Cálcio	
	Magnésio	
	Potássio	

E - INTERPRETAÇÃO DE RESULTADOS

14. Interpretação dos resultados das análises químicas recolhidas durante os programas de monitorização;

Os resultados das análises químicas deverão ser analisados tendo em vista: (1) detectar alterações significativas entre os valores da água nos furos de montante e de jusante e (2) detectar alterações significativas relativamente ao valor de referência.

15. Caracterização do tipo de poluição e da sua extensão para os diferentes sistemas analisados;

16. Interpretação dos diferentes resultados obtidos face ao tipo de lixiviado presente, às situações hidrogeológicas e climatéricas presentes e a idade do sistema;

17. Análise da possibilidade em extrapolar os resultados para outras situações semelhantes.

F - AVALIAÇÃO DE IMPACTES E POSSÍVEIS MEDIDAS DE MITIGAÇÃO

18. Avaliação dos impactos ambientais negativos esperados com a propagação da pluma poluente e quantificação preliminar dos respectivos custos;

19. Análise de possíveis medidas de contenção/reabilitação a adoptar nos casos em que foi detectada poluição.

4.4 Investigação sobre Protecção de Águas Subterrâneas

4.4.1 Programa de Investigação P5 - Zonamento e mapeamento automático de perímetros de protecção de captações de águas subterrâneas

4.4.1.1 Objectivos do Projecto

O resultado final deste projecto pretende ser uma metodologia que auxilie à definição de perímetros de protecção e à prevenção da contaminação de águas subterrâneas, que se disponibilizará para integração nos estudos de águas subterrâneas em curso no âmbito dos Planos de Bacia Hidrográfica. Tais planos estão em elaboração em Portugal e nos restantes Estados-Membros da União Europeia, no âmbito na nova **Lei-Quadro da Água**, até 2004 na sua versão provisória e até 2005 na versão final (*cf.* Capítulo Primeiro).

Os aspectos a considerar neste projecto são as seguintes:

1. Definição de zonas de protecção;
2. Definição de critérios para a identificação e caracterização de fontes poluentes de águas subterrâneas;
3. Mapeamento e zonamento de perímetros de protecção de zonas piloto;
4. Definição de critérios para extrapolação ao território nacional;
5. Mapeamento de perímetros de protecção à escala regional, para a região de Lisboa e Vale do Tejo (1:250 000);
6. Mapeamento de perímetros de protecção à escala nacional (1:500 000).

Pretende-se que o mapeamento de Portugal Continental permita uma visualização expedita dos limites médios dos **perímetros de protecção de captações de águas subterrâneas**.

Esse mapeamento, a desenvolver globalmente à escala 1:500 000 e, regionalmente à escala 1:250 000, permitirá aos técnicos das Direcções Regionais do Ambiente e do INAG o conhecimento, de uma forma integrada, das características hidrogeológicas que condicionam a modelação matemática do escoamento e do transporte de massa em águas subterrâneas, elementos fundamentais ao traçado dos limites dos perímetros de protecção de captações.

4.4.1.2 Definição de Perímetros de Protecção

Apresentou-se já, no Capítulo Quarto, uma revisão bibliográfica sobre critérios para o estabelecimento de perímetros de protecção de captações de águas subterrâneas e sugestões do autor para a sua aplicação em Portugal (*cf.* CIABATTI e LOBO-FERREIRA (1994) e LOBO-FERREIRA e CIABATTI, 1996).

4.4.1.3 Programa de Trabalhos

Seleccionar-se-ão diversas áreas de estudo na Região de Lisboa e Vale do Tejo, que possibilitem o estabelecimento de regras práticas para a delimitação expedita de perímetros de

protecção em torno das captações implantadas nessa área, que compreendam o critério temporal, por exemplo a indicação da localização de isócronas de tempos de percolação de 50 dias.

O processo de definição dos perímetros de protecção é normalmente moroso se realizado para cada captação individualmente. Pretende-se desenvolver um método prático e simples que englobe a totalidade das captações de uma região.

A metodologia a seguir será a seguinte:

1. Selecção das captações mais representativas do tipo, ou tipos, de aquífero (poroso, carbonatado ou fracturado) presentes na área a estudar.

2. Recolha da informação necessária relativamente aos aquíferos e às captações; se necessário, realização de trabalhos de campo que possibilitem a medição *in situ* de alguns parâmetros (*e.g.* pH, condutividade eléctrica, etc.) e a amostragem de água subterrânea nessas captações para posterior análise química.

3. Selecção do critério e método mais adequados com base na informação disponível.

4. No âmbito deste estudo, e para além do método seleccionado na tarefa anterior, seria interessante explorar as capacidades dos ensaios com traçadores uma vez que, e de acordo com ITGE (1991), o seu emprego permite conhecer com precisão, a direcção e sentido do fluxo da água subterrânea e, no caso de aquíferos cársicos, permite elaborar uma cartografia do sistema de condutas existentes no subsolo. Além disso, trata-se de um método que muito raramente tem sido aplicado. No âmbito da delimitação dos perímetros de protecção, este método permite concluir se, a partir de um determinado ponto, a água alcançará, ou não, a captação que se pretende proteger e, se tal acontecer, quanto tempo demorará. Para a aplicação deste método será necessário:

- seleccionar a substância mais indicada para utilizar como traçador;

- injectar uma quantidade conhecida da solução de traçador;

- seguir a sua evolução espacio-temporal, recorrendo à amostragem e análise sistemática da água das captações que se encontrem na possível trajectória da água subterrânea.

5. Selecção do modelo matemático mais adequado, caso o método a utilizar seja o da modelação matemática do escoamento e do transporte de poluentes em águas subterrâneas.

6. Delimitação das zonas de protecção das captações seleccionadas para o estudo utilizando o método seleccionado e também os ensaios com traçadores, para posterior comparação de resultados.

7. Mapeamento das zonas de protecção para a área em estudo. Para tal considerar-se-ão as seguintes variáveis hidrogeológicas: velocidade intersticial V das águas subterrâneas, a obter pela fórmula de Darcy que relaciona o gradiente hidráulico médio i (da superfície piezométrica h com a distância s), a condutividade hidráulica K e a porosidade eficaz Sy_{ef}:

$$V = \frac{K \cdot \partial h / \partial s}{Sy_{ef}}$$

Cada uma destas variáveis (*i.e.* K, i, h, s, Sy_{ef}), e o zonamento final, serão caracterizadas e mapeadas em Sistema de Informação Geográfica (SIG). Pretende-se ainda obter um conjunto de relações matemáticas (em expressões ou em ábacos) que permitam inferir, a partir de modelos digitais de terreno, a relação esperada entre o relevo topográfico e a superfície piezométrica, de modo a se poder calcular automaticamente, em SIG, o gradiente hidráulico médio (i).

8. Inventariação e localização das fontes de contaminação antropogénica, existentes e potenciais, no interior de cada zona de protecção. As fontes existentes são aquelas que se sabe já terem causado, ou ameaçado causar, contaminação da água subterrânea; as fontes potenciais são aquelas que podem, ou não, já ter causado contaminação das águas subterrâneas mas que têm potencial para que tal aconteça.

9. Análise de critérios para definição de estratégias de gestão das fontes potenciais de contaminação.

Uma vez que o principal objectivo da protecção das captações é prevenir a contaminação da água para abastecimento público, a gestão das fontes de contaminação é uma fase importante de um plano de protecção. Uma das estratégias de gestão poderá ser a implantação de um sistema de monitorização.

10. Mapeamento da vulnerabilidade obtido através do cálculo do índice de vulnerabilidade DRASTIC.

11. Estabelecimento de uma relação entre os perímetros de protecção e o índice de vulnerabilidade DRASTIC com a eventual criação de um ábaco.

Pretende-se facilitar, no futuro, a tarefa de definição das zonas de protecção de captações de água subterrânea com base na vulnerabilidade das formações aquíferas, *i.e.*, sabendo em que formações se encontra implantada a captação é possível saber qual o seu índice de vulnerabilidade através do mapeamento do índice DRASTIC e, através da relação estabelecida durante este projecto, será mais fácil ter uma ideia quanto às dimensões das zonas de protecção a implantar em torno da referida captação.

É importante salientar que a definição de um período de tempo para revisão periódica das zonas de protecção é extremamente importante como medida de prevenção; se necessário, as dimensões das zonas de protecção poderão ser alteradas.

12. Elaboração de um Relatório Final com a descrição dos trabalhos desenvolvidos durante o estudo, os resultados obtidos e sua análise, as conclusões e as recomendações.

4.5 Investigação sobre Qualidade e Reabilitação de Águas Subterrâneas

4.5.1 Programa de Investigação P6 - Desnitrificação in situ de aquíferos poluídos por nitratos

4.5.1.1 Enquadramento

A identificação dos principais focos de poluição e respectivo risco associado que vem sendo efectuada no âmbito dos Planos de Bacia Hidrográfica (em curso), permitiu caracterizar a situação nacional relativamente às áreas que globalmente apresentam maior risco de poluição (as lixeiras, as minas abandonadas, as áreas industriais, as instalações militares, as áreas de grande abastecimento de combustível e as áreas agrícolas).

Por outro lado, o mapeamento das zonas de diferente vulnerabilidade à poluição das águas subterrâneas, foi inicialmente efectuada à escala 1:500 000 (Continente). Presentemente existe também à escala 1: 250 000 para algumas áreas (*p.e.* Plano de Bacia Hidrográfica do Rio Tejo) e à escala 1: 100 000 para a zona costeira de Caminha a Vila Real de Santo António.

O cruzamento da informação referida com o tratamento dos dados existentes sobre a qualidade das águas subterrâneas veio confirmar a existência de zonas poluídas nas áreas com maiores índices de vulnerabilidade à poluição.

De acordo com os dados obtidos para a Bacia do Tejo (*cf.* LOBO-FERREIRA *et al.*, 1999), essas zonas correspondem a formações de aluvião e a áreas cársicas, sendo o tipo de poluição mais generalizado o excesso de nitratos e de ferro. Enquanto que o ferro resulta, em grande parte dos casos, do próprio processo de circulação se efectuar em meios geológicos naturalmente ricos em ferro (caso dos granitos e xistos do Maciço Antigo), os nitratos resultam da excessiva carga de fertilizantes utilizados na agricultura. Na Região Autónoma dos Açores é também conhecida a poluição por nitratos nas águas subterrâneas causada essencialmente pela lixiviação de compostos azotados provenientes das práticas agrícolas e da pastagem livre de gado verificada nas ilhas daquele arquipélago (LOBO, 1993).

O aumento da concentração em nitratos nas águas subterrâneas é um problema que se verifica desde a década de 70, mas que tem vindo a agravar-se de forma acentuada nos últimos anos.

Este problema não é exclusivo de Portugal. Estudos sobre a evolução da concentração de nitratos em águas subterrâneas, efectuados por diversos países da Europa e pelos Estados Unidos têm verificado a sua presença em teores excessivos, com tendência para aumentarem (VAN der HOEK e KLAPWIJK, 1987; HAMON e FUSTEC, 1991; HISCOCK *et al.* 1991 e DAHAB, 1991).

Prevê-se que este tipo de poluição venha a sofrer um futuro aumento provocado não apenas pela introdução de novas fontes de azoto mas também por lixiviação do azoto actualmente retido nos solos e que será, em parte, mobilizado para as águas subterrâneas. Neste contexto, é imperativo que se adoptem medidas no sentido de minimizar o alastramento da poluição por nitratos nas águas subterrâneas e no sentido de reabilitar os aquíferos já poluídos.

4.5.1.2 Objectivos do Projecto

O projecto que se propõe centra-se na análise e optimização do desempenho da aplicação de tecnologias de desnitrificação *in situ* visando a remoção de nitratos em solos e aquíferos. Com este projecto visa-se contribuir para o aperfeiçoamento das metodologias actualmente em desenvolvimento para a remoção de nitratos no seio dos próprios aquíferos, verificando a sua aplicabilidade e versatilidade para diversas situações hidrogeológicas e para águas com características hidroquímicas diferentes.

Neste projecto serão utilizados diferentes processos e meios de induzir a desnitrificação por forma a testar a sua adequabilidade, as vantagens e os inconvenientes dos diversos tipos de aplicações e os valores óptimos de adição de elementos indutores da desnitrificação. **Serão seleccionados dois aquíferos** que apresentem características hidrogeoquímicas distintas, contendo **excesso de nitratos.**

O estudo basear-se-á principalmente em trabalhos experimentais de desnitrificação *in situ*, através dos quais se pretende evoluir, comparando com estudos anteriores realizados neste domínio, para conclusões de aplicação universal.

4.5.1.3 Benefícios a Alcançar

O actual estado de conhecimentos sobre as tecnologias apropriadas para a remoção *in situ* de nitratos em águas subterrâneas permitem apontar a **desnitrificação biológica como o processo que apresenta melhor desempenho.** Não obstante, muitas incertezas subsistem na aplicação das tecnologias para a descontaminação *in situ* relacionadas com os seguintes aspectos:

- tipo de meio envolvente - o tipo de formações geológicas (porosas, fracturadas e cársicas) onde é possível ter sucesso na descontaminação, as condições físicas, químicas e biológicas ideais para o processamento da desnitrificação, e
- os processos de desnitrificação em si mesmos - nomeadamente na optimização da fonte de energia a adicionar à água para o melhor desenvolvimento dos processos, pH mais favorável.

Com este projecto pretende-se contribuir para incrementar os conhecimentos no domínio da desnitrificação *in situ* através da quantificação dos parâmetros mais relevantes para o bom desempenho destas tecnologias, parâmetros esses relacionados quer com o meio envolvente quer com as variáveis do próprio processo de desnitrificação.

A experiência prática a obter será posteriormente analisada à luz de outros casos de estudo semelhantes por forma a extrapolar condições gerais de aplicação de tecnologias de desnitrificação. Com o estudo pretende-se optimizar valores de concentração de orgânicos na água de injecção, valores de pH do meio e concentração de oxigénio dissolvido, para os casos estudados. Pretende-se ainda analisar a adequabilidade de algumas condições físicas do meio como o regime de escoamento e hidrogeologia das formações onde se desenvolvem as experiências, porosidade e permeabilidade hidráulica mínimas para o bom desempenho das tecnologias.

Pretende-se que a optimização dos processos acima descritos permita igualmente determinar as condições ideais para evitar a colmatação da matriz porosa através da acumulação de matéria orgânica e de gases à volta dos furos, aspecto que constitui presentemente um dos

maiores entraves ao bom desempenho da desnitrificação *in situ*.

4.5.1.4 Revisão do Estado Actual de Conhecimentos

Aprofunda-se a revisão apresentada no Capítulo Quarto com uma breve revisão específica dos aspectos essenciais ao estudo da ***desnitrificação***.

A conjugação da presença de nitratos em excesso no horizonte superficial do solo (essencialmente causada pela utilização excessiva de fertilizantes) associada aos processos de irrigação intensiva induzem o arraste e a lixiviação de compostos azotados para zonas mais profundas do subsolo, até eventualmente atingirem as águas subterrâneas. Também o próprio processo de recarga natural pode ser responsável pela lixiviação do azoto presente em excesso no solo. As áreas onde a superfície piezométrica é elevada, ou sazonalmente elevada, e onde os solos são mais permeáveis são as mais vulneráveis a este tipo de poluição.

As características químicas dos nitratos nomeadamente a sua elevada estabilidade química, a elevada solubilidade e a fraca tendência para serem adsorvidos e precipitarem tornam as técnicas convencionais de tratamento, tais como a filtração e a troca catiónica, pouco apropriadas para a remoção deste composto (DAHAB (1991) e APPELO e POSTMA, 1993). Não obstante, outros métodos têm sido utilizados, com sucesso, na redução de nitratos na água. Estes métodos incluem a precipitação química, a destilação, a osmose inversa, a electrodiálise, a troca iónica e a desnitrificação biológica ou biodesnitrificação (MARIOTTI (1986), VAN DER HOEK e KLAPWIJK (1987) e DAHAB, 1991).

A utilização dos processos referidos para o tratamento convencional da água é muito cara sendo o tratamento *in situ* uma opção muito promissora na medida em que utiliza a própria formação geológica do aquífero da área em torno de um determinado furo de captação como um reactor da desnitrificação.

Do conjunto de processos referidos para a remoção de nitratos em águas é a biodesnitrificação aquela que apresenta melhor desempenho, menos efeitos secundários negativos e que é do ponto de vista económico mais viável, para a desnitrificação de águas (MARIOTTI (1986), VAN DER HOEK e KLAPWIJK (1987), VAN DER HOEK *et al.*(1988), DAHAB (1991), HAMON e FUSTEC (1991) e HISCOCK *et al.*, 1991).

Neste projecto será analisada exclusivamente a biodesnitrificação para a remoção *in situ* de nitratos de águas subterrâneas. Esta tecnologia representa actualmente a tecnologia com melhor desempenho necessitando, contudo, de um forte investimento na investigação dos processos *in situ*. O processo é essencialmente conseguido através da redução de nitratos a azoto pela acção biológica (ROHMANN e SONTHEIMER (1985), MARIOTTI (1986), VAN DER HOEK e KLAPWIJK (1987), VAN DER HOEK *et al.* (1988) e HISCOCK *et al.*, 1991).

Os processos de remoção *in situ* do nitrato das águas subterrâneas baseiam-se na estimulação artificial do processo de desnitrificação - processo através do qual o nitrato é convertido a azoto gasoso pela acção de bactérias desnitrificadoras (*cf.* APPELO e POSTMA (1993) e HISCOCK *et al.*, 1991) através da injecção de uma fonte de energia capaz de acelerar o processo (HAMON e FUSTEC, 1991). Estas tecnologias utilizam o aquífero não só como meio de suporte para a desnitrificação mas também para o tratamento secundário, como a filtração e re-aeração da água desnitrificada, antes da sua extracção (HISCOCK *et al.*, 1991). Desta forma, o tratamento *in situ* possui a vantagem, em relação à extracção e tratamento posterior da água, de efectuar além da desnitrificação ainda o tratamento secundário da água:

$$5\ CH_2O + 4\ NO_3^- \leftarrow \rightarrow 2\ N_2\ (g) + 4\ HCO_3^- + CO_2 + 3\ H_2O$$

Os principais processos responsáveis pela desnitrificação resultam da acção biológica de bactérias heterotróficas e autotróficas, sendo as primeiras as mais activas. Os diferentes tipos de bactérias distinguem-se umas das outras pelo facto de as primeiras utilizarem compostos orgânicos como fonte de carbono e as segundas utilizarem o dióxido de carbono para o mesmo fim (HAMON e FUSTEC, 1991). A *Pseudomonas*, as *Alcaligenes* e as *Flavobacterium* são bactérias heterotróficas que permitem uma activa desnitrificação dos ambientes naturais. A desnitrificação utilizando bactérias autotróficas põe alguns problemas, sendo um método pouco utilizado apesar de poder apresentar resultados satisfatórios.

A acção das bactérias desnitrificadoras é condicionada por um conjunto de factores que interferem no seu desempenho, podendo inibir o processo mesmo em presença de carbono orgânico. Os factores que podem interferir positivamente nos processos de desnitrificação podem sintetizar-se em: (1) ambientes com pouca quantidade de oxigénio; (2) presença de matéria orgânica em quantidade suficiente (*cf.* CHAMP *et al.* (1979) *in* HISCOCK *et al.*, 1991), a maioria das águas subterrâneas tem concentrações adequadas de minerais para suportar a biosíntese; (3) pH neutro; e (4) temperaturas elevadas. Os valores óptimos necessitam de ser calibrados *in situ*, para diversas situações.

Os principais factores que afectam o desempenho desta tecnologia são a concentração química natural do substrato, a distância da injecção ao furo de captação e o regime hidráulico em presença, sendo necessário calibrar estes parâmetros. A desnitrificação por acção biológica implica a presença de uma fonte de carbono capaz de fornecer a energia necessária ao metabolismo biológico e em ambientes anóxicos.

Algumas das **vantagens** de aplicação de processos de desnitrificação *in situ* podem sintetizar-se nos seguintes aspectos (VAN DER HOEK e KLAPWIJK (1987), DAHAB (1991) e HISCOCK *et al.*, 1991):

1. O processo é extremamente eficaz na redução do conteúdo inicial de nitratos na água;
2. permite realizar a desnitrificação e o tratamento secundário da água no seio do aquífero;
3. a sua aplicação é feita no local evitando custos de bombagem, tanques de armazenamento, instrumentação e de outras amenidades físicas;
4. as variações de temperatura nos aquíferos são bastante constantes, permitindo manter a eficiência do sistema;
5. não há produção de químicos indesejáveis como produtos secundários do tratamento;
6. o processo é fácil de realizar e os custos de manutenção são baixos.

Não obstante, algumas importantes **desvantagens** são também, em certos casos, reconhecidas, resultando em grande parte do desconhecimento do seu desempenho *in situ*:

1. a inibição do processo por alteração de determinadas características como o conteúdo em oxigénio e em carbono, o pH e a temperatura; contudo, estes aspectos são geralmente pouco acentuados nas águas subterrâneas onde é pouco usual encontrar oscilações significativas destes parâmetros;
2. a utilização de carbono em excesso pode trazer necessidade de tratamento adicional para desinfecção da água;
3. a possível contaminação bacteriológica;

4. alguma dificuldade em controlar o processo;
5. a possível formação de matéria orgânica insolúvel e de alguns produtos residuais solúveis que podem colmatar os poros das formações envolventes.

Em Portugal, diversos trabalhos sobre a temática recuperação de aquíferos contaminados foram publicados por LEITÃO *et al.* (1992, 1993, 1994) e LEITÃO (1997).

4.5.1.5 Programa de Trabalhos

O programa de trabalhos do projecto, traçado de acordo com os objectivos anteriormente apresentados, foi dividido em três fases distintas, por sua vez subdivididas em diferentes aspectos, que contemplam: (1) a Fase A - de caracterização prévia das condições hidrogeológicas e hidroquímicas vigentes antes do início da descontaminação; (2) Fase B - estudo e optimização dos processos de desnitrificação e (3) Fase C - análise do comportamento a médio prazo do aquífero em processos de desnitrificação.

A primeira fase tem por objectivo a caracterização, tão completa quanto possível, do comportamento físico e químico das águas subterrâneas em condições normais, isto é, anterior ao início da descontaminação. A análise do aquífero em condições de equilíbrio permite detectar a presença de elementos químicos e biológicos, que possam interferir no processo, constituindo uma indispensável fonte de informação para a definição de um modelo conceptual de funcionamento do aquífero.

A segunda e terceira fases integram o tema principal do projecto: a optimização dos processos de desnitrificação de águas subterrâneas aplicados *in situ*.

FASE A - Caracterização hidrogeológica e hidroquímica dos aquíferos estudados, antes do início da desnitrificação

1. Selecção de dois locais, um na ilha Terceira (Açores) e outro numa zona agrícola da região de Lisboa e Vale do Tejo, com problemas de poluição por nitratos nas águas subterrâneas e com características hidrogeoquímicas e hidrogeológicas distintas;
2. Estudo geológico e hidrogeológico preliminar dos locais, com base em infra-estruturas existentes;
3. Execução de cerca de três furos auxiliares, em cada local de estudo;
4. Realização de ensaios de caudal, nomeadamente para determinação dos valores de permeabilidade;
5. Estudo hidrogeológico detalhado - com base na informação recolhida e nos ensaios de caudal efectuados nos três furos - para determinação das características de permeabilidade do meio e de porosidade das formações, da direcção de escoamento hidráulico, do gradiente hidráulico e da velocidade média de escoamento;
6. Monitorização *in situ* da qualidade das águas dos aquíferos, nomeadamente dos parâmetros pH, Eh, temperatura, condutividade e oxigénio dissolvido. A monitorização será feita nos diversos furos e a diferentes profundidades por forma a observar eventuais estratificações da qualidade da água; o processo será realizado trimestralmente ao longo de um ano;
7. Recolha de amostras de águas subterrâneas para a análise das características hidroquímicas

gerais da água bem como das suas características bacteriológicas, antes de se dar início ao processo de desnitrificação;

8. Estabelecimento de eventuais correlações entre a população bacteriana e a presença de nitratos na água;
9. Estabelecimento da profundidade a que se pode encontrar bactérias de origem fecal nas formações geológicas.

FASE B - Análise da desnitrificação para diferentes condições de actuação. Optimização das condições utilizadas

10. Injecção de água, nos três furos auxiliares, contendo dois tipos de fontes de carbono orgânico capazes de desencadear a acção das bactérias desnitrificadoras; injecção de metanol e estrume de animal; análise do desempenho do processo para os dois casos, nos dois aquíferos;
11. Bombagem da água tratada nos furos centrais, com caudal a determinar dependendo do tipo de formações hidrogeológicas;
12. Recolha de amostras para análises químicas nos dois furos principais, centrais; durante a experiência estima-se a recolha de 2 amostras por dia em cada furo, nos primeiros 15 dias, que passarão a 1 amostra diária num período 45 dias; as amostras a recolher nos dois furos somam um total de 150;
13. Utilização de diferentes quantidades dos dois orgânicos;
14. Recolha de amostras para análises químicas nos dois furos principais, centrais; durante a experiência estima-se a recolha de 2 amostras por dia em cada furo, nos primeiros 15 dias, que passarão a 1 amostra diária num período 45 dias; as amostras a recolher nos dois furos somam um total de 150;
15. Análise dos resultados das experiências anteriores e optimização de valores;
16. Análise da influência dos vários parâmetros de temperatura, do pH e do Eh por forma a estabelecer a importância, para os casos analisados, de cada um dos parâmetros e as condições óptimas de operação;
17. Análise da variação bacteriana ao longo do processo de desnitrificação;
18. Análise da influência do tipo de solo, da hidrogeologia, das condições de escoamento, da população bacteriana existente e da distância entre furos, por forma a estabelecer as condições mais favoráveis.

FASE C - Análise do comportamento do aquífero a longo prazo, para as condições de operação óptimas definidas nas fases anteriores

19. Repetição dos ensaios correspondentes às condições óptimas de desnitrificação obtidas nas fases anteriores, nomeadamente de tipo e quantidade de carbono orgânico fornecido através da injecção de água nos furos auxiliares;
20. Análise do comportamento do aquífero a longo prazo, nomeadamente em termos da diminuição de conteúdo em nitratos e de ausência de colmatação;
21. Recolha de amostras para análises químicas nos dois furos principais, centrais; serão recolhidas amostras diárias num período de cinco meses, num total de cerca de trezentas

(300) amostras;

22. Extrapolação dos resultados obtidos.

4.5.1.6 Características da Equipa de Trabalho

Perfil desejado para a equipa incluiu: engenheiros civis, geólogos e hidroquímicos com formação em estudos de poluição em águas subterrâneas e sua descontaminação, e especialistas de solos e de análises físico-químicas e microbiológicas de águas.

4.5.2 Programa de Investigação P7 - Interacção qualitativa águas superficiais - águas subterrâneas: Aplicação ao caso de estudo dos campos da Golegã, no Paúl do Boquilobo

4.5.2.1 Objectivos do Estudo

Constituem principais objectivos do projecto os seguintes aspectos:

1. análise da problemática relacionada com a interacção águas superficiais - águas subterrâneas;
2. análise da vulnerabilidade e do risco à poluição das águas subterrâneas da região;
3. caracterização da qualidade das águas subterrâneas e a análise da sua tendência evolutiva;
4. estabelecimento de medidas a adoptar para a protecção dos recursos hídricos subterrâneos.

O cumprimento dos objectivos propostos implica o desenvolvimento de diversas etapas intermédias. Essas etapas incluem: (1) o complemento dos estudos de caracterização geológica e hidrogeológica já efectuados pelo LNEC (*cf.* NOVO e LOBO-FERREIRA, 1994), com base em novos dados a recolher nos furos; (2) a caracterização da vulnerabilidade à poluição das formações presentes na região; (3) o levantamento exaustivo das fontes de poluição presentes na região; (4) a monitorização das águas subterrâneas da região; (5) monitorização qualitativa das águas superficiais, incluindo as do rio Almonda; (6) análise da qualidade das águas subterrâneas da região e a determinação de eventuais efeitos causados pelos focos de poluição pontual e difusa; (6) a modelação qualitativa das águas subterrâneas e (7) a análise de medidas a adoptar para a protecção dos recursos hídricos da região.

4.5.2.2 Antecedentes

Pretende-se apresentar esta proposta ao Instituto de Conservação da Natureza (ICN). Caso o ICN considere apropriado o estudo que se propõe constituirá uma segunda fase do *Estudo sobre a Análise da Influência da Água Subterrânea dos Campos da Golegã no Paúl do Boquilobo*, sobre aspectos relacionados com a qualidade das águas do Paúl do Boquilobo (*cf.* NOVO e LOBO-FERREIRA, 1994).

THEVES e LOBO-FERREIRA (1995) efectuaram já uma primeira revisão bibliográfica de aspectos relacionados com a interacção águas superficiais - águas subterrâneas.

4.5.2.3 Análise de Factores Qualitativos de Águas Subterrâneas

Considerações gerais

A qualidade química primária das águas subterrâneas está intimamente relacionada com o tipo de formações por onde circula e que lhe conferem determinadas características químicas próprias. A qualidade natural ou primária das águas subterrâneas está, contudo, sujeita a alterações induzidas pelas actividades urbanas, agrícolas, pecuárias e industriais. De facto, estas

actividades contribuem de algum modo para lançar nos cursos de água ou no solo poluentes que, por sua vez, durante os processos de infiltração, são arrastados para zonas mais profundas do subsolo, eventualmente atingindo as águas subterrâneas.

As actividades que maior influência têm na alteração/deterioração da qualidade das águas são usualmente agrupadas em actividades urbanas, agro-pecuárias e industriais, repartindo-se a sua acção da seguinte forma:

1. Actividade urbana: A rejeição e a deposição sem tratamento dos efluentes líquidos e sólidos de áreas urbanas contribui de forma evidente para a poluição dos aquíferos:

- No nosso País a inexistência de sistemas de recolha e de tratamento de esgotos para grande parte da população contribui para a utilização de fossas sépticas, frequentemente não limpas com a periodicidade necessária, ou ainda a utilização de outros tipos de soluções, sem a preocupação de protecção das águas subterrâneas. Presentemente projecta-se a recuperação desta situação até ao final do ano 2006 (data limite do 3º Quadro Comunitário de Apoio, quando Portugal deverá finalmente atingir as médias comunitárias de atendimento em saneamento básico). Tal virá certamente a contribuir de forma muito positiva para o controlo desta situação, sem contudo permitir solucionar os danos anteriormente causados ao ambiente, que terão de ser objecto de recuperação específica.

- Por outro lado, as áreas projectadas para tratar efluentes ou resíduos e que apresentam deficiências de funcionamento podem também provocar problemas de poluição. São disso exemplo os aterros sanitários, as bacias e as lagoas de efluentes líquidos, as lamas e os contentores de resíduos não devidamente impermeabilizados ou que apresentem rupturas. As actividades referidas contribuem para a existência de poluição essencialmente no que respeita a níveis elevados de contaminação orgânica, coliformes e compostos inorgânicos não metálicos.

2. Actividade agro-pecuária: Estes dois sectores têm uma importância fundamental na origem dos problemas de contaminação do País, pelo menos no que diz respeito à sua dispersão geográfica. No que respeita à agricultura, a origem destes problemas deve-se à generalizada ausência de aplicação de conhecimentos de uma agricultura moderna e simultaneamente protectora do ambiente, sendo ainda prática corrente a utilização excessiva de fertilizantes e pesticidas. Como consequência são dissolvidos e lixiviados uma grande parte dos elementos móveis que não foram consumidos pelas culturas e que por isso se encontram retidos nos solos.

- No caso da pecuária os efeitos da poluição revelam-se na deposição directa de excrementos, estrume, etc., no solo e sua subsequente migração para zonas mais profundas. Os efeitos de ambos os tipos de poluição traduzem-se nos índices de contaminação orgânica, compostos inorgânicos não metálicos e coliformes encontrados nas águas.

3. Actividade industrial: A indústria mineira, de produção de papel, produção de adubos e outros produtos químicos são alguns exemplos das fontes de poluição de origem industrial. As formas de poluição têm origem nos processos de rejeição de efluentes líquidos em linhas de água a céu aberto e de parques de lamas não impermeabilizados, portanto com deposição directa no solo e consequente migração de elementos até às águas subterrâneas. Estes casos e também a deposição de poluentes atmosféricos no solo constituem os problemas mais graves de poluição industrial no País.

- Os processos de contaminação das águas subterrâneas, geralmente referidos como transporte de poluentes, estão intimamente relacionados com o modo como se processa a **recarga** e o

escoamento da água nos aquíferos. O grau de contaminação depende por seu lado do tipo de formações geológicas do aquífero e sobre o aquífero, da profundidade da zona vadosa, do material do aquífero e da condutividade hidráulica. Estes são alguns dos factores que afectam directamente o escoamento e o tempo de contacto entre a água e os poluentes retidos no solo, determinando assim a sua retenção na matriz porosa ou a sua migração para zonas mais profundas do subsolo.

- Para o correcto desenvolvimento de um estudo da qualidade das águas subterrâneas é fundamental que se integrem as seguintes etapas: (1) a monitorização adequada do aquífero; (2) a análise da sua **vulnerabilidade** à poluição; (3) a análise do comportamento dos elementos químicos e sua evolução no subsolo. Nas secções seguintes desenvolvem-se alguns deste itens em maior detalhe antes de se definir a metodologia a adoptar para este Estudo, referida no capítulo seguinte.

Monitorização da qualidade das águas subterrâneas

O estudo da qualidade das águas subterrâneas com vista à determinação de eventuais efeitos causados por fenómenos de poluição deve, caso existam vários aquíferos sobrepostos, recair sobre o aquífero mais superficial. Por este motivo, no estudo que agora se propõe será dada especial ênfase à análise do aquífero superficial da região.

A **monitorização** de um aquífero é um dos aspectos principais de um estudo sobre a sua qualidade, pois é com base nos resultados obtidos que são analisados os processos de transporte e as estratégias de protecção dos recursos. A correcta monitorização implica a utilização de infra-estruturas adequadas, capazes de conservar as condições hidrogeológicas e hidroquímicas naturais do aquífero.

Para o correcto desenvolvimento deste projecto de investigação serão seleccionados os furos que melhor permitam a obtenção de dados representativos da qualidade da água do aquífero, de acordo com as considerações apresentadas no Capítulo Terceiro.

A recolha de dados hidrogeoquímicos e a amostragem de águas subterrâneas nos furos de monitorização será realizada com base em campanhas de amostragem. As amostragens deverão realizar-se para diferentes períodos do ano hidrológico por forma a ter em conta a sua variação anual.

Análise da vulnerabilidade à poluição

Como foi referido no Capítulo Segundo, a vulnerabilidade surge como um conceito que permite integrar vários parâmetros caracterizadores do meio subterrâneo e da sua especificidade, permitindo distinguir tipos de aquíferos diferentes, como por exemplo os aquíferos porosos, os fracturados e os cársicos, que possuem comportamentos hidrogeológicos completamente distintos.

4.5.2.4 Programa de Trabalhos

A metodologia a adoptar para o desenvolvimento do estudo será a seguinte:

a) Complemento da caracterização e síntese analítica da geologia dos Campos da Golegã feita por NOVO e LOBO-FERREIRA (1994) para o estudo dos fenómenos relacionados com os aspectos qualitativos das águas subterrâneas.

b) Complemento da caracterização hidrogeológica da região dos Campos da Golegã feita por NOVO e LOBO-FERREIRA (1994) para o estudo dos fenómenos relacionados com os aspectos qualitativos das águas subterrâneas.

c) Actualização da caracterização da recarga do aquífero superficial com base nos novos dados a recolher nas actividades indicadas nas alíneas anteriores.

d) Análise da vulnerabilidade à poluição da região dos Campos da Golegã e Paúl do Boquilobo por aplicação do método DRASTIC.

d1) caracterização dos parâmetros hidrogeológicos necessários à aplicação do método DRASTIC;

d2) aplicação do método DRASTIC e **mapeamento da vulnerabilidade** das formações geológicas da região, se possível **à escala 1:10 000.**

e) Levantamento das potenciais fontes de poluição da região:

e1) análise dos principais processos de utilização agrícola do solo da região dos Campos da Golegã, com especial atenção para o uso de nitratos e de pesticidas, e ainda à rejeição e identificação dos locais de rejeição de efluentes urbanos e industriais, volumes rejeitados (se possível), bem como a área afecta à sua libertação;

e2) análise das características dos poluentes;

e3) análise do potencial comportamento dos poluentes no subsolo.

f) Caracterização do risco de poluição da região dos Campos da Golegã e Paúl do Boquilobo, através da junção dos resultados da vulnerabilidade e dos focos de poluição identificados.

g) Monitorização e caracterização da qualidade das águas subterrâneas na região dos Campos da Golegã e Paúl do Boquilobo:

- propõe-se que a caracterização da qualidade das águas subterrâneas seja realizada com base na recolha de dados em poços e/ou furos;
- a recolha de dados hidrogeoquímicos e a amostragem de águas subterrâneas serão realizadas, em duas campanhas de amostragem, com cerca de seis meses de intervalo, possivelmente em Maio/Junho de 2001 e em Dezembro/Janeiro de 2001/2002.

O desenvolvimento deste tarefa será efectuado nas seguintes etapas:

g1) monitorização e caracterização global da qualidade das águas subterrâneas com base em dois tipos de procedimentos: (1) registo contínuo, em diferentes locais e a diversas profundidades, dos parâmetros de pH, Eh, condutividade, temperatura e oxigénio dissolvido (a realizar com uma sonda multiparamétrica e data-logger existentes no LNEC.DH.GIAS, caso os furos se adaptem a este tipo de procedimento) e (2) de análises químicas dos iões principais presentes em amostras de águas subterrâneas a recolher durante o estudo. Serão recolhidas amostras para a análise de, pelo menos, os seguintes iões principais na água: HCO_3^-, SO_4^{2-}, Cl^-, NO_3^-, Mg^{2+}, Ca^{2+}, K^+ e Na^+;

g2) identificação de eventuais fenómenos de poluição relacionados com as práticas agrícolas e outras actividades antropogénicas potencialmente poluidoras detectadas na região.

Este item será desenvolvido através de análises químicas de amostras de água a recolher nas duas campanhas de amostragem dos furos de monitorização (nomeadamente pesticidas, compostos nitrogenados, fosfatos e amónia);

g3) monitorização qualitativa das águas superficiais da região, incluindo as do rio Almonda;

g4) determinação das potencialidades da água em termos da sua qualidade, tendo em vista a sua utilização: (1) para consumo humano e (2) para rega.

h) Modelação da qualidade das águas subterrâneas do aquífero superficial.

Em função dos dados disponíveis será seleccionado e aplicado um modelo matemático adequado ao estudo dos fenómenos de transporte de poluentes em águas subterrâneas, eventualmente o modelo GLEAMS, abordado em NOVO e LOBO-FERREIRA (1990). Pretende-se vir a conhecer o padrão dos caminhos preferenciais de contaminação, as taxas potenciais médias de concentração de poluentes, e os tempos médios de percolação. Será utilizada a experiência de modelação matemática qualitativa de águas subterrâneas existente no LNEC.DH.GIAS, de que se salienta, além da contida na referência acima mencionada, a publicada em LOBO-FERREIRA (1986 e 1988).

i) Indicação das medidas genéricas a adoptar para a protecção dos recursos hídricos subterrâneos da região do Paúl do Boquilobo.

4.6 Investigação sobre Optimização e Gestão de Águas Subterrâneas

4.6.1 Programa de Investigação P8 - Simulação, optimização e gestão de sistemas aquíferos sujeitos a intrusão salina

4.6.1.1 Enquadramento

A história do planeamento e gestão de aquíferos é caracterizada pela preocupação de tornar cada vez mais realistas os modelos de optimização construídos. Essa preocupação reflecte-se em dois aspectos: um primeiro que tem a ver com a incorporação, de uma forma rigorosa, do comportamento físico dos aquíferos (para o que contribuiu fortemente a utilização do conceito de matriz de influência ou dos coeficientes de influência); um segundo que tem a ver com a consideração de funções, nomeadamente funções de custo, que traduzam as condições reais de intervenção.

A atenção que tem sido dada à formulação realista de modelos de optimização, tem levado a que as técnicas de optimização usadas para resolver os problemas tenha também evoluído. A literatura mostra que a área das águas subterrâneas é a área dos recursos hídricos em que mais rapidamente se tem aplicado as inovações em termos de técnicas desenvolvidas pelos matemáticos da investigação operacional. O trabalho que tem vindo a ser realizado nomeadamente nas universidades de Coimbra, de Lovaina, na Bélgica, e de Princeton, nos EUA, publicados por CUNHA (1990 a 1999) reflecte os aspectos referidos, especialmente no que diz respeito à consideração de funções de custo adequadas (que na melhor das hipóteses serão não-lineares).

Propõe-se neste projecto de colaboração entre o LNEC e a Universidade de Coimbra, o desenvolvimento de um projecto de planeamento e gestão de aquíferos, incluindo os aspectos quantitativos ligados aos aspectos qualitativos decorrentes de intrusão salina ou de poluição acidental. Prosseguir-se-á, caso a proposta seja bem sucedida, a análise de MIGLIARI e LOBO-FERREIRA (1997) sobre o caso de estudo de Palmela.

4.6.1.2 Objectivos do Projecto

Os principais objectivos deste projecto de investigação são os seguintes:

- análise de modelos numéricos para simulação e avaliação da intrusão salina em aquíferos costeiros;
- análise das situações de emergência para captações de águas subterrâneas, resultantes de acidentes de poluição, e programação das restrições matemáticas correspondentes;
- análise das situações de emergência para captações de águas subterrâneas, resultantes de sobreexploração, e programação das restrições matemáticas correspondentes;
- desenvolvimento de um modelo de optimização para determinação da melhor localização das captações de águas subterrâneas e o correspondente desenvolvimento de interfaces "*amigáveis*".

4.6.1.3 Revisão do Estado Actual de Conhecimentos

A síntese dos conhecimentos sobre optimização e gestão de águas subterrâneas foi desenvolvida no Capítulo Quinto. Recordam-se as reflexões feitas sobre carências de investigação:

- A gestão de sistemas de águas subterrâneas não-lineares foi bem resolvida por diversas técnicas, mais dentro do campo dos algoritmos da Programação Linear do que no campo da Programação Não-Linear. Estas técnicas, pelo contrário, podem ser ferramentas eficazes para tratar problemas de gestão de águas subterrâneas com funções objectivo não-lineares.
- As maiores limitações correntes dos modelos de Simulação/Optimização (S/O), pelo menos na área do abastecimento por águas subterrâneas, parecem ser as relacionadas com a sua aplicação num quadro determinístico. Aplicações estocásticas ou do tipo *chance-constrained*, incorporando parâmetros de incerteza relativo às águas subterrâneas e às condições de fronteira, têm ainda sido pouco aplicados. Em consequência, a abordagem óptima para a tomada de decisões em águas subterrâneas não é adequada à filosofia emergente baseada no risco, em questões relativas a projectos de engenharia com componentes hidrogeológicas. Num esquema de optimização do tipo *chance-constrained*, é admitida a probabilidade de se falhar uma restrição, mas não é usualmente acoplado o custo de insucesso em termos monetários. Em resumo, sem o desenvolvimento de investigação apropriada dirigida para a remoção destas limitações, outras ferramentas de tomada de decisão, menos gerais mas mais versáteis e adaptadas a abordagens do tipo *risk-balancing*, poderão vir a ser preferidas.
- Outra área de investigação, ainda subestimada, é a da integração em modelos únicos, da gestão do abastecimento por águas subterrâneas e da gestão da qualidade das águas subterrâneas para a determinação de estratégias de utilização de águas subterrâneas que juntem à satisfação óptima das necessidades de água a satisfação das restrições ou dos objectivos especificados de qualidade das águas subterrâneas. Na verdade, a investigação sobre o tema da gestão da qualidade das águas subterrâneas, ligada à necessidade das acções de reabilitação de aquíferos, recebeu um grande impulso na última década. Um esforço de investigação equivalente deveria ser feito para permitir o cruzamento de considerações de qualidade de águas subterrâneas com as do contexto de engenharia do abastecimento por águas subterrâneas, uma vez que seria melhor evitar a degradação da qualidade das águas subterrâneas em vez de se ter de implementar estratégias de reabilitação posteriores. Esta necessidade é particularmente sentida na exploração de aquíferos costeiros.

4.6.1.4 Análise da Intrusão Salina

Os aquíferos costeiros constituem um recurso importante de água doce. Muitas zonas costeiras estão densamente urbanizadas, facto este que torna a necessidade de água doce ainda mais crítica. No entanto, a proximidade do mar e da zona de contacto entre a água doce e a água salgada num aquífero costeiro, requer especial atenção e técnicas de gestão adequadas.

A bombagem intensa e prolongada de água doce provoca uma descida do nível piezométrico relativamente ao nível inicial, e no caso de não existir compensação dessa extracção por

recarga natural ou artificial do aquífero, pode desenvolver-se deste modo o fenómeno de intrusão salina.

Os conhecimentos teóricos demonstram que o processo de intrusão salina em aquíferos costeiros pode ser previsto através da modelação e controlado em relação aos elementos do balanço hídrico. **Trata-se pois de um verdadeiro problema de gestão de aquíferos costeiros.**

Quando o avanço da interface atinge os poços em exploração verifica-se a sua contaminação manifestada pelo excesso de cloretos na água. Em termos reais, esta situação torna-se ainda mais perigosa em virtude da existência de uma zona de transição em vez de uma interface abrupta. Por causa desta zona de transição, o incremento da salinidade num poço em exploração serve de aviso para o provável avanço da salinização no aquífero.

De acordo com JIANGONG *et al.* (1992), o fenómeno da intrusão salina provoca um ciclo vicioso que se exemplifica do seguinte modo:

Bombagem intensiva → rebaixamento dos níveis piezométricos → intrusão salina → contaminação das águas subterrâneas → diminuição dos recursos hídricos subterrâneos utilizáveis → rebaixamento da superfície piezométrica regional → intensificação do rebaixamento dos níveis piezométricos → intensificação da intrusão salina.

JIANGONG *et al.* (1992) referem dois tipos de factores que podem afectar a intrusão salina: factores naturais e humanos. No primeiro caso incluem-se os factores climáticos que afectam a recarga dos aquíferos e os factores hidráulicos e hidrogeológicos que determinam o fluxo subterrâneo. Contudo, são os factores humanos os mais determinantes, como a extracção intensiva dos recursos subterrâneos consequente do desenvolvimento industrial e urbano.

4.6.1.5 Desenvolvimento da Componente de Optimização

Uma das principias tarefas deste Programa de Investigação será desenvolvida em cooperação com o **Instituto do Mar** da Universidade de Coimbra: o **desenvolvimento de modelos de optimização** para determinação da melhor localização das captações de águas subterrâneas e o correspondente desenvolvimento de interfaces "*amigáveis*".

O principal objectivo desta tarefa é o desenvolvimento de modelos de optimização para auxílio aos gestores de sistemas de abastecimento de água em situações de emergência.

O modelo de optimização a desenvolver permitirá seleccionar a melhor localização para as captações de águas subterrâneas, tendo em consideração diferentes cenários de poluição acidental e de intrusão salina em aquíferos costeiros, por forma a prevenir danos graves nos sistemas de abastecimento de água. Potencialmente há muitas situações que poderão vir a ser analisadas.

Os **mapas de vulnerabilidade** a desenvolver providenciarão informação fundamental sobre quais os locais a usar em situações de emergência (tanto em situações de acidentes de poluição como de intrusão salina). Os modelos de optimização escolherão de entre esses locais quais os que reúnem as melhores condições para a localizações das captações, de modo a serem satisfeitas as necessidades hídricas para abastecimento, e tendo em consideração diferentes objectivos, eventualmente múltiplos (*e.g.* minimização dos custos, minimização dos riscos de contaminação, redução da distância entre fontes de captação e destinos de abastecimento, satisfação e preservação dos requisitos ambientais, etc.).

A resolução de problemas deste tipo é tarefa difícil devido à complexidade matemática dos correspondentes modelos. De facto, trata-se habitualmente de modelos não-lineares com variáveis discretas.

No entanto, os desenvolvimentos recentes verificados no campo da investigação operacional, especialmente no campo da "*global optimisation*", permitem encarar a resolução de problemas reais e de dimensão significativa.

Em Portugal, ainda se não iniciou o desenvolvimento deste tipo de análise aplicada a problemas de exploração e de gestão de recursos hídricos subterrâneos, estando em causa aspectos relacionados com a intrusão salina ou a poluição acidental. Assim, em conformidade com as carências de investigação detectadas no Capítulo Quinto, será desenvolvida neste programa de Investigação uma heurística baseada na ideia de *simulated annealing*. Os algoritmos *annealing* são algoritmos de pesquisa aleatória, que se comprovou serem muito eficientes para a resolução de problemas formulados de forma discreta ou combinatória. Na procura da solução óptima esses algoritmos utilizam uma estratégia *descendente*, mas permitem movimentos *ascendentes* podendo, assim ser ultrapassadas as principais desvantagens dos métodos clássicos de optimização, *i.e.* ficarem retidos em soluções óptimas apenas locais, impedindo a obtenção do óptimo global do problema.

4.6.1.6 Metodologias de Estudo

A salinização das águas subterrâneas é devida a uma fonte de salinidade ou à combinação de mais do que uma. As fontes mais comuns de introdução de sais dentro de um aquífero são, além da intrusão salina, a lixiviação de sais devido à precipitação ou à dissolução de minerais evaporíticos desde a superfície do solo até às formações aquíferas; a mistura com águas congénitas ou com águas fósseis aprisionadas nas formações sedimentares e ainda fontes antropogénicas como os fertilizantes e fontes industriais.

As metodologias de estudo do fenómeno de intrusão salina permitem avaliar a evolução da interface, no espaço e no tempo. Englobam métodos hidrogeológicos, hidrogeoquímicos, isotópicos, geofísicos e a aplicação de modelos numéricos (PULIDO (1987) *in* EVANGELISTA, 1989).

Numa primeira fase deste projecto devem ser utilizados métodos hidrogeológicos que têm como objectivo conhecer as características hidráulicas do aquífero, a sua geometria e funcionamento, tendo como base um estudo geológico local. O fluxo subterrâneo regional pode ser determinado com base em registos contínuos dos níveis piezométricos. Outro aspecto importante consiste na drenância ou fluxo vertical entre diferentes aquíferos que permite a mistura de águas de qualidade diferente. O local a seleccionar deverá dispor de uma rede de monitorização adequada.

As técnicas hidrogeoquímicas são complementares das anteriores e têm como objectivo conhecer o contacto água doce-água salgada. Os iões maiores e outras características físicas da água poderiam ser determinados nas campanhas de amostragem e deste modo seria possível calcular certos índices hidrogeoquímicos que permitem detectar a presença de intrusão salina e/ou de outros fenómenos modificadores. Alguns estudos incluem a análise dos isótopos ambientais para identificar correctamente a fonte poluente.

As técnicas geofísicas, por métodos eléctricos, complementam as anteriores e poderiam também ser utilizadas neste projecto. Os registos contínuos de salinidade ou condutividade eléctrica e temperatura a partir de sondagens são muito úteis nestes estudos porque permitem

determinar facilmente a qualidade da água e distinguir dentro de uma sondagem diferentes qualidades.

Os estudos geoeléctricos são muito úteis na determinação da extensão da intrusão salina num aquífero costeiro. De acordo com GABBANI e GARGINI (1992), a diferença entre a resistividade dos depósitos aluviais invadidos pela água do mar e a resistividade dos depósitos aluviais onde este efeito não ocorreu resulta numa anomalia que pode ser facilmente detectada em mapas de resistividade que se obtiveram através da realização de diversas Sondagens Eléctricas Verticais. Apesar da eficiência desta técnica, os resultados obtidos devem ser cuidadosamente verificados e comparados com os dados estratigráficos obtidos nos furos, uma vez que torna impossível determinar, apenas com base nos resultados das Sondagens Eléctricas Verticais, se um nível com elevada condutividade se trata de um aquífero contaminado, de um depósito orgânico argiloso ou de uma deposição recente em ambiente lagunar salobro (GABBANI e GARGINI, 1992).

A monitorização dos furos deve incluir medições regulares dos níveis piezométricos, *logs* de salinidade e temperatura para determinar a distribuição vertical da salinidade, recolha de amostras para análise química dos catiões maiores e de outros parâmetros físico-químicos. Durante a amostragem, deve ter-se em atenção que nos furos crepinados em diferentes profundidades existe um risco eventual de mistura de águas de diferente qualidade, devido ao fluxo vertical ao longo do furo, sobretudo se se estiver a bombear a parte superior do sistema aquífero.

A análise conjunta dos registos de salinidade, dos caudais extraídos nas captações e da precipitação na área de estudo podem dar-nos indicações importantes sobre a variação da salinidade. Isto porque, durante o Inverno a recarga aumenta e se as extracções foram menos intensas a salinidade nos furos tende a estabilizar.

Uma outra metodologia que poderia ser utilizada consiste no estudo de diagramas de diluição água doce/água salgada marinha que permite determinar a idade e a origem das águas subterrâneas salinas.

A modelação numérica da intrusão salina permite a resolução de problemas relacionados com a salinização das águas subterrâneas. Estes modelos devem envolver o estudo, a simulação e a gestão dos sistemas aquíferos sob condições especiais, que se relacionam especialmente com a variação da densidade do fluído e com o transporte dos sais em formações heterogéneas.

As duas aproximações possíveis são a situação de uma interface brusca entre dois fluídos que se consideram imiscíveis ou a situação de uma zona de transição e de variação contínua de densidade, entre dois fluídos que se consideram miscíveis. Alguns investigadores aplicaram modelos bi-dimensionais de elementos finitos (SUTRA) ou de diferenças finitas (MOCDENSE - que se adapta à variação da densidade dos fluídos presentes), enquanto outros optaram pelos modelos tri-dimensionais de diferenças finitas que consideram a densidade variável (HST3D - disponível no LNEC).

4.6.1.7 Locais a Seleccionar

De acordo com SANTOS *et al.* (1991), as regiões onde é mais provável a ocorrência de problemas de poluição de aquíferos situam-se no litoral centro e norte, onde existe elevada concentração urbano-industrial, e ainda na região do Algarve. Nestas regiões, como consequência de uma excessiva exploração dos aquíferos costeiros, detectam-se também problemas de salinização de captações com origem no fenómeno de intrusão salina. No

entanto, existem outros fenómenos que se manifestam do mesmo modo que a intrusão, tais como a dissolução de rochas evaporíticas, a mobilização de águas fósseis ou o uso intensivo de fertilizantes.

Os locais de estudo a seleccionar incluem os aquíferos costeiros da região de Setúbal e os aquíferos costeiros da região Algarvia.

Um dos problemas que afecta a região hidrográfica do Tejo na sua parte costeira é a sobreexploração do sistema aquífero na bacia do Baixo Sado, na zona industrial de Setúbal, que tem originado um aumento progressivo dos teores de sais nas águas subterrâneas captadas (CARREIRA *et al.*, 1994).

De acordo com estes autores, o fenómeno de salinização está muito localizado, uma vez que os furos sem salinizações elevadas ocorrem muito próximos de furos cuja salinização aumenta bastante de ano para ano.

O litoral algarvio é uma região onde se tem verificado uma constante expansão do turismo e da actividade agrícola, levando a um aumento na procura das águas subterrâneas cuja quantidade e qualidade tem vindo a decair (SILVA e SILVA, 1992).

De acordo com COSTA *et al.* (1985), a ocorrência de aquíferos costeiros e de uma forte exploração dos mesmos, associados à ocorrência de águas cloretadas e de maiores mineralizações junto ao litoral, sugerem a hipótese de intrusão marinha. No entanto, também ocorrem águas cloretadas e sulfatadas com elevada mineralização longe da costa, concluindo-se que ocorrem outros fenómenos causadores do aumento da salinidade e dos valores de cloretos, designadamente estruturas diapíricas de rochas salíferas, aflorantes ou profundas, reconhecidas na bacia sedimentar algarvia, por métodos geofísicos.

Na região Algarvia propõem-se duas áreas de estudo, designadamente a região de Portimão e a região de Vila Real de Santo António.

No concelho de Portimão, e de acordo com os Serviços Municipalizados de Portimão (1994), a salinização dos furos de captação desses Serviços Municipalizados permitiu inferir um avanço da interface água doce/água salgada de cerca de 2 km em 10 anos, ou seja, de 200 m/ano.

Os dados hidroquímicos fornecidos por estes Serviços Municipalizados incluem as concentrações de cloretos e de sulfatos detectadas nos furos de captação localizados em ambas as margens do troço mais a jusante da Ribeira de Farelo. Os dados disponibilizados relativamente às concentrações de cloretos abrangem o período de 1983 a 1994. Os dados disponibilizados relativamente às concentrações de sulfatos são muito dispersos. Em relação aos dados de piezometria do aquífero e aos caudais explorados nas captações os dados disponibilizados são até ao momento muito insuficientes.

Na região de Vila Real de Santo António, e de acordo com AFONSO (1983), a modelação matemática do aquífero livre existente nas dunas de Monte Gordo permitiu o conhecimento das zonas em que a água se encontrava poluída quimicamente e da posição da interface água doce/água salgada na data em que as sondagens foram efectuadas. Após uma época de exploração intensa (Setembro/1990), verifica-se que a interface avançou no sentido dos furos, não sendo todavia um avanço significativo, devido à baixa transmissividade junto ao mar e ao Guadiana, e à pequena possança do aquífero, o que reduz bastante o risco de salgamento daquele.

4.6.1.8 Programa de Trabalhos

FASE A - Caracterização Geológica e Hidrogeológica de um Aquífero Costeiro:

Numa fase inicial do projecto a caracterização geológica e hidrogeológica incluirá:

1. inventário dos pontos de água;
2. caracterização da recarga de aquíferos;
3. mapeamento da vulnerabilidade à poluição das águas subterrâneas.

FASE B - Aplicação de um Modelo de Simulação Numérica de Intrusão Salina:

4. análise de diversos tipos de modelos numéricos para a simulação da intrusão salina;
5. definição da área em estudo e discretização da zona em células (diferenças finitas) ou elementos (elementos finitos);
6. análise das condições de fronteira e iniciais a introduzir no modelo;
7. análise da previsão de consumos de água e dos cenários de exploração;
8. análise das situações de emergência e das restrições hidrogeológicas e ambientais.

FASE C - Desenvolvimento de Modelos de Optimização e de Sistemas de Apoio à Decisão para Localização de Captações de Águas Subterrâneas

Nesta fase será concebido o modelo de optimização para a gestão e exploração do sistema aquífero tendo em linha de conta o apresentado anteriormente para controlo do movimento da interface água doce / água salgada.

5. PARTE 2 - INVESTIGAÇÃO NA EUROPA

5.1 Países da União Europeia

5.1.1 Programa de Investigação P9 - AC1 - COST: The Future of Water in Europe

5.1.1.1 Considerações Gerais

Com base no estipulado no Quinto Programa-Quadro, em relação às acções COST, salientou-se no **Capítulo Oitavo** o seguinte:

O programa COST, que se estende muito para além da União Europeia, constitui um instrumento útil para promover a cooperação e incentivar a coordenação mútua das actividades nacionais e internacionais em vasta escala, tanto no plano temático como geográfico, bem como para estimular a participação dos investigadores oriundos de países em fase de pré-adesão nas actividades pan-europeias. A sua flexibilidade continuará a ser aproveitada para intensificar a exploração de novas ideias e de novos domínios científicos e tecnológicos. Os métodos de associação entre as ***actividades COST*** *e as actividades do* ***Programa-Quadro*** *serão melhorados, tendo em vista tirar maior proveito da potencial sinergia entre os dois instrumentos, em especial no que respeita à realização das acções-chave e das actividades genéricas do Programa-Quadro. O programa dará apoio técnico e financeiro à administração do COST.*

Apresentam-se neste Programa de Investigação as linhas mestras para elaboração de uma Proposta de Acção Concertada de Investigação Europeia sobre o ***Futuro da Água na Europa***, coordenada pelo Director do Instituto do Ambiente do Joint Research Centre (JRC) da Comissão Europeia, Dr. J.M. Martin, que conta com a participação do autor.

O *draft* da proposta em elaboração com o JRC é apresentado directamente em língua inglesa:

5.1.1.2 Antecedentes

Water is one of the main vectors for Sustainable Development, for which the international community became more aware of existing problems, in Rio in 1992 and in Noordwijk in 1996. All concerns related to water resource management cannot be dealt so far, in a simply sectored or localised approach. The increasing consumption and pollution may lead to difficulties in the use of resources, so that water may become, in the coming decades, an essential factor limiting economic and social development. ***Therefore, a global and integrated water resources management in needed.***

In Europe*, water stress (both in quantity and quality) exists in many places, resulting in serious problems (water shortage, flooding, pollution and ecosystem damage). One third of European countries have relatively low availability of water (i.e. less than 5000 cubic metres of water per head per year) moreover, 20 European countries depend on other countries for*

more than 10% of their water resources. ***Groundwater is over-exploited*** *in 60% of large European cities. On the supply side, drinking water losses from the distribution system are still too high (estimated to an average of 30% in most European countries). It is well known that* ***deterioration of water quality*** *in Europe is caused by* ***pollution from agriculture,*** *industry and households, resulting in abnormally high concentrations in* ***Nitrates,*** *Phosphorous and Pesticides.* ***Protecting the quality of*** *drinking* ***water from contamination*** *by chemicals and harmful organisms is obviously a pre-requisite for good health of the European citizens. Finally, climate change must also be taken into account for the future water supplies.*

So, there is an urgent need to devise and anticipate strategies for the sustainable use of water resources in the European union.

The ***Task-Force "Environment-Water"*** *(1996-1998) set up by three Commissioners, has stimulated a very useful reflection and debate on these issues, especially those dealing with freshwater resources, and has identified short and medium term priorities for research and innovation in the area of freshwater management and use.*

5.1.1.3 Objectivos e Benefícios

Os objectivos da Acção Concertada o ***Futuro da Água na Europa*** são os seguintes:

1. *Identifying emerging problems for a better sustainable management of water resources in Europe and surrounding countries (including Mediterranean partners).*
2. *Promoting intensive interdisciplinary co-operation in the field of water resources management and to* ***update water priorities in Europe****, by building bridges between researchers, companies and policy makers (water management is no longer restricted to professionals of the sector, but involves more and more professional organisations, representatives of water users, members of national parliaments, local elected officials, NGO's...).*
3. *Drafting guidelines for policy and decision-makers.*

5.1.1.4 Programa Científico

4 prospective topic areas:

To improve the knowledge of water potentials

1- To improve institutional management capacities

2- To update ambient water quality objectives and protection of aquatic ecosystems

3- To focus on drinking water supply and health.

The following four Working Groups will be set up:

WG1: knowledge of water potential

WG2: institutional management capacities

WG3: ambient water quality objectives and protection of aquatic systems

WG4: drinking water supply and health

The duration of the Action is planned for ***five years***.

The following COST countries and NGO's have actively participated in the preparation of the Action or otherwise indicated their interest: Italy, France, Germany, Netherlands, United Kingdom, Belgium, Portugal, Norway, IME, TECHWARE.

5.1.1.5 História da Proposta

The idea for a new "horizontal" COST Action was born at the end phase of the Task-Force "Environment-Water". One crucial question was thought to be investigated in more details: How water resources should be used, allocated or shared and managed in Europe *over a long-term period* in order to achieve a **sustainable balance between demand and supply**. *Anticipating problems*, which may appear in the next twenty years, and exploring relevant solutions were considered to be a very important issue for future investigations. This requires:

- *an up-dating of priorities*, in the field of research (including socio-economic research), technological development, management and training .
- *a global integrated approach*, for many problems dealing with water are closely interconnected. In order to achieve this goal, a wide consultation is not sufficient. It is essential to strengthen the existing European network for a better dialogue between all the stakeholders involved (government agencies, utilities, water-management bodies, research institutes, private companies ...) and to involve the actors from surrounding countries (candidates countries from Central Europe and third Mediterranean partners).

Taking into account this last point, preliminary contacts have been kept in preparing the present draft.

5.1.1.6 Participação Directa do Autor na Acção Concertada

Propõe-se que a actividade a desenvolver pelo autor seja equivalente à que desenvolveu em 1996 e 1997 no âmbito da *Task Force Environment • Water*, (*cf.* MELO BAPTISTA e LOBO-FERREIRA (1997), disponível em http://www.dh.lnec.pt/gias/novidades/tfewE.html), coordenando a participação portuguesa nesta acção COST e fazendo parte do grupo de trabalho do TechWare, de que o LNEC é um dos membros fundadores.

5.2 Rússia

5.2.1 Programa de Investigação P10 - INTAS: Methods of groundwater vulnerability assessment and mapping in case of massive and local chemical and radioactive contamination

5.2.1.1 Enquadramento

O programa INTAS, financiado pela Comissão Europeia, tem por objectivo a cooperação comunitária com os Novos Estados Independentes, resultantes da cisão da União Soviética e dos estados do Leste e Centro da Europa. Do financiamento a atribuir a um projecto INTAS, apenas 20% é destinado aos parceiros comunitários proponentes (no mínimo dois). A contribuição comunitária é, assim, quase que exclusivamente destinada à coordenação, a missões de intercâmbio científico e a *overheads*. No entanto, se um projecto comunitário tiver tido sucesso e tiver sido ou estiver a ser financiado pela Comissão Europeia e/ou por um Estado-Membro, torna-se possível desenvolver nova actividade científica. A génese do projecto que se propõe foi precisamente essa: baseada na experiência adquirida pelo LNEC em **modelação matemática de águas subterrâneas** e no mapeamento da **vulnerabilidade de aquíferos à poluição** e nas **apresentações feitas pelo autor** (1) em Varsóvia, **Polónia**, em 1989, no "UN/DTCD Interregional Seminar" (*cf.* LOBO-FERREIRA, 1989), (2) em Moscovo, **Rússia**, em Setembro de 1994, no NATO-Advanced Research Workshop (ARW) "Integrated Rehabilitation of Environmentally Degraded Areas in Central and Eastern Europe" (*cf.* LEITÃO *et al.*, 1995), (3) em Liblice, na **República Checa**, em Setembro de 1995, no NATO ARW "On Regional Approaches to Water Pollution in the Environment" (*cf.* LOBO-FERREIRA, 1996), e mais recentemente em Vilnius, **Lituânia**, em Outubro de 1997, no NATO-ARW "Environment Contamination and Remediation Practices at Former and Present Military Bases" (*cf.* LOBO-FERREIRA, 1998). Neste último Workshop foram estabelecidos os contactos necessários à formulação da proposta que se apresenta, cujo **coordenador científico será o autor** e que se espera possa estar concluída ainda em 1999. A apresentação da proposta é feita directamente em língua inglesa.

5.2.1.2 Objectivos do Projecto

The main objectives of the project are the following:

- to improve simulation techniques for radioactive and chemical contaminant transport through unsaturated zone;
- to develop the methodology of construction of geographical information system on groundwater vulnerability;
- to investigate the vulnerability of groundwater resources of St. Petersburg (Russia) and of Setúbal peninsula (Portugal) areas in case of accidental radioactive and chemical contamination, respectively.

5.2.1.3 Actividades de Investigação

The following research activities will be taken under this project:

1. review and assessment of the hydrogeological information in connection with previous investigations;
2. collection of supplementary data, including ground and groundwater sampling from selected wells and their chemical analysis;
3. **groundwater vulnerability assessment using DRASTIC methodology;**
4. risk analysis of groundwater contamination using probabilistic and fuzzy logic based approaches;
5. creation of computer code for simulation of radioactive and chemical contaminant transport through the unsaturated zone;
6. simulation of radioactive and chemical contaminant transport through the unsaturated zone;
7. construction of vulnerability maps and GIS on groundwater vulnerability in St. Petersburg region;
8. **comparison of results of application of DRASTIC methodology and simulation background and justification.**

5.2.1.4 Justificação

The involvement of simulation technique of contaminant transport in unsaturated zone into geographical information system for groundwater vulnerability assessment is an urgent task for the needs of modern environmental monitoring. It is supposed to solve this problem by fulfilling of this project.

The above-mentioned technique will be tested and verified on the case study of St. Petersburg region where such kind of work has not ever been done and will be compared with the studies previously developed in LNEC for the vulnerability assessment of Setúbal peninsula. It is supposed to do two final products: (1) models of radioactive and chemical contaminant transport for different geologically typical areas of St. Petersburg region and geographical information system which reflects the vulnerability of main drinking groundwater reservoirs of St. Petersburg (Russia) region and (2) the actual potential risks mapping of Setúbal peninsula region, *i.e.* the overlaying of the vulnerability mapping with the potential pollution sources.

There is a wide range of possible applications of proposed research. The most important scientific output will be the improvement of simulation technique of contaminant transport in unsaturated zone and involvement of this technology into geographical information system of groundwater vulnerability assessment.

As the project concerns St. Petersburg and Setúbal peninsula regions the results will be given to the local authorities responsible for emergency water supply. The possibilities of introduction and application of developed methodology of vulnerability assessment in all countries-participants will be considered. It is planned to publish a number of scientific papers in Russian and international journals on the results of the project.

Drinking groundwater reservoirs of St. Petersburg area are insufficiently investigated. The most important aquifers have been already identified, but the protective properties of the covering layers have not yet been properly mapped and assessed.

The knowledge of the transport of contaminants through the unsaturated zone will be based on laboratory studies and field experiments (*cf. Research Programmes P2 and P6*).

According to the recommendations of the Atomic Energy Commission, Vienna, movement of contaminants in groundwater should be evaluated using such physical and mathematical models where physico-chemical transformations of the various compounds during passage through the geological environment are taken into account.

An adequate description of the transport of radioactive contaminant requires good knowledge of physical and chemical properties of the contaminant and good knowledge of the geological environment. The radioactive transformation of the different compounds has to be taken into account, as some of the decay products are more dangerous than the original compounds. Therefore, a rather complex simulation is required to solve this problem. Only a few models of that type are available and the project group will utilise one of them. It is planned to improve simulation technique of radioactive contaminant transport through unsaturated zone taking into account physico-chemical interactions in the system "air - water - solid state" and to create such kind of model for St. Petersburg and Setúbal peninsula regions.

In recent years the environmental protection has received powerful tools of environmental monitoring and mapping. These are geographic information systems which are the computer technology of collection, storage, processing, interpretation and presentation of data which has geographical location. In other words, these are the data management systems for data which have coordinates.

There has been a marked increase in the use of computers for map compilation over the past decade due to the development of software and hardware. This has changed the nature of map production and the very concept of the maps themselves. In the case of groundwater protection, a GIS can provide significantly increased efficiency in data handling, analytical capability, and display flexibility. A GIS also greatly facilitates the cheap and rapid updating of maps as more data becomes available. In this way a map has become a dynamic and continually improving tool of special value for environmental protection and land-use planning. The proposed project will result in the development of the new technique of vulnerability assessment with a help of modern GIS software.

The **concept of vulnerability mapping of aquifers** is not yet completely developed and is still discussed among specialists. Vulnerability mapping with reference to a specific group of contaminants (radioactive compounds), as proposed in this project, will represent new development in this field.

The involvement of simulation technique of contaminant transport in unsaturated zone into geographical information system for groundwater vulnerability assessment is an urgent task for the needs of modern environmental monitoring. It is supposed to solve this problem by fulfilling of this project.

Water supply of St. Petersburg and suburbs is based mainly on surface water - Ladoga Lake and river Neva. At the same time, there are some nuclear facilities in the close proximity to St. Petersburg. The most dangerous of them is Sosnovy Bor nuclear power station, which has the same type of **nuclear reactors as Chernobyl station**. In case of nuclear accident, surface water of the region will not be suitable for public drinking water supply. The authorities of St. Petersburg are developing the alternative water supply system based on groundwater. The new

combined technology of groundwater vulnerability assessment proposed in the project would facilitate to select the location of water well fields for emergency water supply.

Assessment of groundwater vulnerability to chemical contamination is necessary for local authorities of St. Petersburg and Setúbal peninsula regions to provide the safe location of new industrial enterprises as there are some suburbs which use groundwater for local drinking water supply.

5.2.1.5 Programa de Trabalhos

The project will be divided into 10 stages. For each of them one of the partners will be appointed as responsible. These tasks are the following:

1. Review and assessment of the hydrogeological information in connection with previous investigations

The main purpose of this stage is to reveal the sampling points and to carry out preliminary schematisation of unsaturated zone of the investigated regions.

Technical reports of State Geological Enterprise "Sevzapgeologia" and scientific reports and database of the Department of Hydrogeology of St. Petersburg University will be used for this purpose. Modern scientific literature and reports of several other organisations will also be collected and referred.

St. Petersburg (Russia) University and State Geological Enterprise "Sevzapgeologia" will be responsible for this stage.

2. Collection of supplementary data, including groundwater sampling from selected wells and their chemical analysis

The main objective of the stage is to verify the map of zoning compiled during the first stage. The places with typical geological section of unsaturated zone will be selected and about 40 ground samples from different depths and 20 groundwater samples will be taken.

Ground and groundwater sampling will take place within a 100 km radius from St. Petersburg. About 10 locations typically containing 2 - 6 fresh water aquifers are found within this radius.

Granulometric and mineralogical composition of the soil of unsaturated zone and chemical composition of groundwater will be obtained on this stage. Further details of structure of unsaturated zone will be mapped.

The fulfilment of the stage will show whether the location of sampling points is correct enough for the success of simulation of contaminant transport. There is no opportunity to compare the zoning mapping results as it has not ever been done before for St. Petersburg.

State Geological Enterprise "Sevzapgeologia" will be responsible for this stage.

3. Groundwater vulnerability assessment using DRASTIC methodology

The groundwater vulnerability can be estimated both in general and in case of selected contaminants. General assessment will be carried out on this stage. Data obtained on previous stages of investigations will be involved. It is proposed to use DRASTIC methodology that is

an index method for general evaluation of the vulnerability of aquifers. Russian domestic methods ("Goldberg methodology") based on the same estimation criteria can also be used. Geographic Information System will be a tool for vulnerability mapping.

The final product on this stage will be a computer **map of groundwater vulnerability using DRASTIC methodology.** The main criterion of success on this stage is sufficient detail of the map to allow the comparison with simulation results (see next task). This depends on the amount and quality of data obtained on the previous stages.

Mutual visits of specialists from **Laboratório Nacional de Engenharia Civil** (National Laboratory for Civil Engineering, Portugal) and St. Petersburg University are planned during this stage.

Laboratório Nacional de Engenharia Civil (Portugal) and St. Petersburg University will be responsible for this stage.

4. Risk analysis of groundwater contamination using probabilistic and *fuzzy logic* based approaches

In order to minimize risks on ecosystems and public health the risk assessment and management framework will be applied. Existing data will be evaluated and analysed. Then, different scenarios will be developed to quantify risks on water supply. Different exposure assessments will be evaluated including drinking water supply and other uses of water (irrigation, industry).

Based on that a Decision Support System (DSS) will be developed which will help local authorities to choose between alternatives of water uses.

Laboratory of Hydraulics of **Aristotle University of Thessaloniki** will be responsible for this task.

5. Creation of computer code for simulation of radioactive and chemical contaminant transport through the unsaturated zone

SOFDEC Ltd. has produced a large number of software packages designed for different situations and covering wide spectrum of radioactive contamination cases.

The basic output of this stage will be the creation of unified software which takes into account all types of processes in the system "air - water - solid state". The software for simulation of contaminant transport through unsaturated zone is based on the next processes: complex formation, hydrolysis, acid - base interactions, acidation - reduction, radioactive decay, radiation-chemical processes, adsorption on colloids - pseudocolloids, adsorption on solid phase (molecular adsorption, ion exchange, isotopic exchange), dissolution and replacement of minerals, formation of mineral sediments, hydrolysis of adsorbed cations, co-precipitation with hydroxides, invasion - evasion of gases, phase transitions of water, transfer by water currents, molecular diffusion, exchange with systems with double media, hydrodynamic dispersion. Models will be created for definite radioactive (Cs 137, Sr 90, Pu 239) and chemical (Pb, Cd, Cu, Zn) contaminants. SOFDEC Ltd. will perform the modelling using the multivariant reactive radioactive compounds transport model.

SOFDEC Ltd. will be responsible for this stage of the project.

6. Generalisation and arrangement of preliminary results

The obtained results will be compared and discussed by all participants and some changes will be made in the program of further activity if necessary.

St. Petersburg University and **Laboratório Nacional de Engenharia Civil (Portugal) will be responsible for this stage of the project.**

7. Simulation of radioactive and chemical contaminant transport through the unsaturated zone

In this part, models for the locations selected on previous stages will be produced, and physico-chemical parameters will be used for simulation. An assessment of vulnerability of different sites for emergency water supply system will be based on site-specific computer simulation of radioactive and chemical contaminant transport.

The main task of the stage is to obtain the time of contaminant transport through unsaturated zone at different concentration of contaminants on the surface and different climatic situations (rain, snow, dry weather). The data collected during the previous stages and separate blocks of software for calculations of interactions in the system "water - solid state" will be used.

There are some results of field tests and laboratory experiments on contaminant transport in unsaturated zone in definite homogeneous conditions. These results can be the criteria for assessment of simulation accuracy, so it is possible to compare the results of simulation with the data of these experiments and to verify the model by changing some parameters.

If the results of modelling will not correlate with experimental data the model should be transformed or remade.

SOFDEC Ltd. will be responsible for this task.

8. Construction of groundwater vulnerability maps in St. Petersburg region using the results of simulation

The problems related to vulnerability mapping and to the transport of radioactive contaminant in groundwater are quite new and there are many possibilities for improvements in both fields. There are two main objectives of such work:

- to develop the methodology of construction of groundwater vulnerability maps using geographical information systems;
- to present the results of investigation of the vulnerability of groundwater resources in St. Petersburg (Russia)/Setúbal peninsula (Portugal) area in case of accidental chemical or radioactive contamination in clear and user-friendly form.

The main inputs for such work will be:

- previous developments of Hydrogeology Department of St. Petersburg University in the field of MapInfo application for environmental aspects of hydrogeology including groundwater quality and vulnerabilty assessment;
- results of simulation of contaminant transport in the unsaturated zone obtained on the previous stage.

The expected outputs can be summarised as follows:

- new methodology of vulnerability mapping will be developed;
- relative risk of groundwater contamination will be assessed.

Hydrogeology Department of St. Petersburg University will be responsible for this task, **in contact with Laboratório Nacional de Engenharia Civil.**

9. Comparison of results of application of DRASTIC methodology and simulation

To obtain verified data on groundwater vulnerability of St. Petersburg and of Setúbal peninsula regions is the main objective of the stage.

Vulnerability maps constructed using two different methodologies will be compared by statistical methods with each other and real situation with groundwater contamination nowadays. Comparability of results will allow to elaborate unified methodology for groundwater vulnerability assessment. The possibility and preference of application of traditional mapping or simulation for different locations with definite natural conditions will be considered.

Applications of the mentioned methodologies for the investigations of different scale will be considered and their advantages and disadvantages will be revealed.

Significant scientific contribution to the project will be made during this stage if it will be possible to unite two above-mentioned approaches to vulnerability mapping. Nevertheless, this purpose may not be achieved in case of incomparability or insufficient accuracy of results of mapping. Common trends of alterations of groundwater vulnerability estimated using two methodologies may not be found.

St. Petersburg University will be responsible for this task, **in contact with Laboratório Nacional de Engenharia Civil.**

10. Generalisation and dissemination of the final results

Joint meeting of all participants will be organised to discuss final scientific results and their practical application.

As the project concerns St. Petersburg and Setúbal peninsula regions the results will be given to the local authorities responsible for emergency water supply. Authorities of St. Petersburg will receive a tool for planning of emergency water supply system in case of massive contamination of the environment. The results will be introduced to the activity of State Geological Enterprise "Sevzapgeologia" as it responsible for regional groundwater monitoring.

The possibilities of introduction and application of developed methodology of vulnerability assessment in all countries-participants will be considered. Exchange of information and experiences on ecological mapping among all participants will take place. It is planned to publish a number of scientific papers in Russian and international journals on the results of the project.

St. Petersburg University will be responsible for this task, **with the co-operation of the co-ordinator** (*i.e.* **LNEC).**

5.2.1.6 Benefícios a Alcançar

The **first 12-month report** will be a computer map of zoning according to the mineralogical, lithological and chemical composition of unsaturated zone and its thickness. A map of groundwater vulnerability will be compiled using DRASTIC methodology. The description of the model of contaminant transport through unsaturated zone will also be presented.

The **final report** will include results of computer simulation of radioactive and chemical contaminant transport through the unsaturated zone in St. Petersburg region and groundwater vulnerability maps for this region compiled according to the combination of traditional methodology and simulation results. The map of risk of groundwater contamination in case of radioactive and chemical accidents will also be presented. The methodology of construction of groundwater vulnerability maps using geographical information systems will be described in the report. Recommendations for local authorities will be issued.

There is a wide range of possible applications of proposed research. The most important scientific output will be the improvement of simulation technique of contaminant transport in unsaturated zone and involvement of this technology into geographical information system of groundwater vulnerability assessment.

As the project concerns St. Petersburg region the results will be given to the local authorities responsible for emergency water supply. The possibilities of introduction and application of developed methodology of vulnerability assessment in all countries-participants will be considered.

5.2.1.7 Parceiros

1. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (Portugal) - In the topics related to optimisation and management of groundwater resources LNEC intends to sub-contract the University of Coimbra (Instituto do Mar), partner in Research Projects P8 - MEDEA - MED.

2. Aristotle University of Thessaloniki (Greece) - Its contribution will be in the field of risk analysis of groundwater contamination using probabilistic and fuzzy logic based approache.

3. Hydrogeology Department, Geology Faculty of St. Petersburg State University - The project will be fulfilled by the Hydrogeology Department of St. Petersburg State University.

4. SOFDEC Ltd. - Russian consulting company working within the field of evaluation of movement of contaminants in groundwater.

5. State Geological Enterprise "Sevzapgeologia' - Department of the Hydrogeology and Engineering Geology

6. PARTE 3 - INVESTIGAÇÃO NO RESTO DO MUNDO

6.1 Países de África: Mediterrânicos, PALOP e África do SUL

6.1.1 Programa de Investigação P11 - Desenvolvimento de metodologias para avaliação de recursos e riscos hidrogeológicos de ilhas vulcânicas: Portugal (Porto Santo e Graciosa), Cabo Verde (Sto. Antão), S. Tomé e Príncipe (Príncipe), Guiné-Bissau (Bijagós)

6.1.1.1 Enquadramento

Do ponto de vista da União Europeia (UE) a gestão e a protecção das águas subterrâneas, um sistema de características muito específicas e complexas, deve fundamentar-se necessariamente no conhecimento tão completo quanto possível de todas as variáveis do sistema. Este conhecimento deve ser adquirido após a interpretação e análise de informações actualizadas dos recursos (quantidade e qualidade), dos seus utilizadores (actuais e potenciais), assim como das suas interrelações (resposta dos recursos às solicitações). Tal é o espírito do *Plano de Acção Integrada dos Recursos Hídricos Subterrâneos* e da nova *Lei-Quadro da Água*, documentos aprovados pelo Conselho da União Europeia, respectivamente em 1997 e em 1998.

Uma gestão moderna e uma protecção eficaz dos recursos hídricos subterrâneos, em relação à poluição industrial, agrícola e doméstica e, no caso de aquíferos costeiros, em relação à intrusão salina, requerem o domínio de técnicas avançadas de avaliação da recarga de aquíferos e da sua vulnerabilidade à poluição.

Para a generalidade das ilhas dos arquipélagos atlânticos de Portugal (*i.e.* Madeira e Açores), de Cabo Verde (*e.g.* Sto. Antão), de S. Tomé e Príncipe (Príncipe) e da Guiné-Bissau (*e.g.* Bijagós), o conhecimento dos recursos hídricos subterrâneos é ainda incompleto. Por este motivo, a caracterização e o mapeamento dos recursos hídricos subterrâneos do País foram divididos em LOBO-FERREIRA e OLIVEIRA (1993b) em capítulos separados, um para Portugal Continental e outro para os Arquipélagos da Madeira e dos Açores.

A concretização do projecto que se propõe permitirá a reunião de meios técnicos e científicos para o desenvolvimento de metodologias de análise e avaliação de recursos e riscos hidrogeológicos em ilhas vulcânicas, nomeadamente da vulnerabilidade DRASTIC de aquíferos com características hidrogeológicas e climáticas muito distintas.

A par da experiência já adquirida no LNEC no desenvolvimento e aplicação desta metodologia no Continente e, introdutoriamente, nas ilhas do arquipélago da Madeira e dos Açores, junta-se agora o conhecimento científico e factual adquirido recentemente pelos técnicos dos PALOP, nomeadamente apresentados durante os 1º, 2º e 3º SILUSBA, co-organizados pela Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos (*cf.* Capítulo Oitavo, que contaram com a participação do autor). O mapeamento proposto de pelo menos cinco ilhas a seleccionar nos arquipélagos dos Açores (*e.g.* **Graciosa**), Madeira (*e.g.* **Porto Santo**), Cabo Verde (*e.g.* **Sto. Antão**), S. Tomé e Príncipe (*e.g.* **Príncipe**), e Guiné-Bissau (*e.g.* **Bijagós**), permitirá a obtenção de conhecimentos

científicos de vanguarda fundamentais para um correcto planeamento e gestão dos (frequentemente) escassos recursos hídricos destas ilhas atlânticas.

6.1.1.2 Objectivos do Projecto

Pretende-se desenvolver metodologias para a avaliação de recursos hídricos subterrâneos de regiões insulares, nomeadamente de ilhas vulcânicas atlânticas. O **efeito de escala** é de importância fundamental em regiões insulares, não permitindo a aplicação directa e cientificamente fundamentada de métodos já testados no continente português. Pretende-se desenvolver de uma forma sistemática e para um conjunto completo de situações hidrogeológicas e climatológicas distintas, existentes nos arquipélagos atlânticos de Portugal e dos PALOP, modelos conceptuais fundamentados e ferramentas matemáticas apropriadas, que permitirão a extensão dos conhecimentos hidrogeológicos nacionais aos arquipélagos da Madeira e dos Açores. Visa-se durante ou após a conclusão do Projecto a elaboração de um inventário dos recursos hídricos subterrâneos destas ilhas atlânticas. O Inventário dos Recursos Hídricos de Portugal, desenvolvido por LOBO-FERREIRA e OLIVEIRA (1993b), não ficará completo sem a inclusão, caracterização e mapeamento DRASTIC dos diversos sistemas aquíferos das ilhas dos Açores e da Madeira. A elaboração de tal estudo necessita contudo de importante investigação prévia, possível de alcançar no âmbito do Projecto que se propõe, nomeadamente para determinação da escala mais apropriada à sua elaboração. Repare-se que a escala de trabalho adoptada para o Continente em LOBO-FERREIRA e OLIVEIRA (1993b), 1:500 000, é totalmente desadequada para ilhas. Desenvolver-se-ão e calibrar-se-ão para o efeito novos métodos de avaliação da recarga de aquíferos de regiões insulares e de análise da sua vulnerabilidade à poluição, baseados em Sistemas de Informação Geográfica. A especificidade hidrogeológica das ilhas vulcânicas, motivada por uma elevada variação espacial de litologia e hidrogeologia (que implica uma análise detalhada e original do **efeito de escala**), associada aos diferentes tipos e regimes da precipitação insular, inviabiliza actualmente uma aplicação cientificamente fundamentada e directa da metodologia DRASTIC.

Os parâmetros a analisar serão divididos nos seguintes grupos: (1) caracterização quantitativa e qualitativa dos recursos hídricos subterrâneos; (2) caracterização da utilização de águas subterrâneas; e (3) vulnerabilidade à poluição dos aquíferos. Conceptualmente os dados serão subdivididos em: (a) parâmetros estáveis (ex.: valores de permeabilidades) e (b) parâmetros variáveis (ex.: níveis piezométricos). Para um mais eficaz acesso à informação sobre os recursos hídricos subterrâneos insulares, programar-se-á no âmbito do Projecto a primeira Base de Dados portuguesa das ilhas seleccionadas, para parâmetros hidrogeológicos quantitativos e qualitativos de águas subterrâneas. Será armazenada informação sobre: (1) localizações de pontos de água; (2) coluna litológica dos furos; (3) localizações de ralos nas captações; (4) indicação de níveis piezométricos (hidrostáticos, hidrodinâmicos e caudais bombeados); e (5) resultados de análises químicas efectuadas aos elementos maiores.

No âmbito do projecto que se propõe pretende-se seleccionar pelo menos cinco tipos distintos de formações hidrogeológicas insulares (*e.g.* ilhas vulcânicas antigas ou recentes, sedimentares, cársicas, tubos de lava, etc.) com climas também distintos (*e.g.* atlântico húmido, seco, semiárido, etc.).

6.1.1.3 Revisão do Estado Actual de Conhecimentos

No capítulo Segundo apresentou-se a revisão bibliográfica dos métodos de avaliação da recarga de aquíferos e de avaliação da vulnerabilidade à poluição de águas subterrâneas.

A aplicação a **diferentes escalas** apresenta problemas diversos, ainda não solucionados, nomeadamente de interpretação dos dados necessários à caracterização dos parâmetros DRASTIC. OLIVEIRA e LOBO-FERREIRA (1994a) aplicaram o método à **península de Setúbal**, numa área de 1 500 km^2, tendo comparado os resultados obtidos em LOBO-FERREIRA e OLIVEIRA (1993b) com os obtidos para a península. **Embora os resultados obtidos sejam da mesma ordem de grandeza denotaram divergências que suscitam a necessidade de se proceder a uma investigação adicional** sobre o tema para aplicação a novos casos de estudo. Recorda-se a Fig. 2.16, onde se apresentaram os resultado obtidos para o condado de Tippecanoe, nos Estados Unidos. Pode-se assim confirmar o efeito de escala no mapeamento obtido com o método DRASTIC. A conclusão idêntica se chegou no estudo desenvolvido por LOBO-FERREIRA e OLIVEIRA (1994b) após a aplicação do método para avaliação do futuro impacto nas águas subterrâneas do projecto de irrigação do Alqueva, numa área de cerca de 600 ha, aplicando pela primeira vez em Portugal o método DRASTIC desenvolvido para pesticidas. A escala seleccionada para esse estudo foi de 1:250 000. Numa **aplicação** preliminar do **método DRASTIC à ilha da Madeira** NOVO *et al.* (1994a e 1994b) seleccionaram a escala 1:50 000. Para a caracterização da vulnerabilidade DRASTIC da faixa costeira de Portugal Continental (LOBO-FERREIRA *et al.*, 1995d) foi aplicada a escala 1:100 000.

O conhecimento científico sobre a hidrogeologia das ilhas dos arquipélagos dos Açores e da Madeira, que facilitará a efectivação desta proposta, tem vindo a ser desenvolvido pelo LNEC, pelo Laboratório Regional de Engenharia Civil da Madeira (LREC) e pela Universidade dos Açores, desde finais da década de 70, nomeadamente para a caracterização dos recursos hídricos subterrâneos da ilha do Porto Santo (*cf.* LOBO-FERREIRA *et al.* 1981), da ilha da Madeira (*cf.* NOVO *et al.* 1994a,b,c), da ilha de São Miguel (*cf.* LOBO-FERREIRA, 1991) e da ilha Terceira (*cf.* MENESES (1993), RODRIGUES (1993) e NOVO *et al.*, 1997).

6.1.1.4 Programa de Trabalhos

Fase 1 - Análise do efeito de escala nos modelos conceptuais de avaliação de recursos e riscos hidrogeológicos de ilhas vulcânicas e de zonas costeiras:

1.1 - análise dos diferentes tipos de sistemas hidrogeológicos insulares, em função da sua génese e idade (*i.e.* vulcânico antigo ou recente, sedimentar, cársico, tubos de lava, etc.) e da sua climatologia (*i.e.* atlântica húmida, seca, semi-árida, etc.);

1.2 - selecção de pelo menos cinco tipos de hidrogeologia/climatologia diferentes, presente em pelo menos cinco ilhas dos arquipélagos dos Açores (*e.g.* **Graciosa**), Madeira (*e.g.* **Porto Santo**), Cabo Verde (*e.g.* Sto. **Antão**), S. Tomé e Príncipe (**Príncipe**), e Guiné-Bissau (*e.g.* **Bijagós**);

1.3 - determinação da escala de trabalho mínima, compatível com as especificidades hidrogeológicas e climatológicas analisadas nas ilhas seleccionadas.

Fase 2 - Caracterização dos sistemas hidrogeológicos das ilhas seleccionadas e avaliação dos seus recursos hídricos:

2.1 - caracterização dos sistemas hidrogeológicos;

2.2 - avaliação dos recursos hídricos subterrâneos, quer renováveis, *i.e.* recargas regionais de aquíferos, quer reservas hídricas subterrâneas contidas nos sistemas hidrogeológicos, dando-se atenção especial ao estudo e quantificação da drenância proveniente de níveis aquíferos suspensos;

2.3 - caracterização das utilizações de águas subterrâneas;

2.4 - elaboração de mapas em Sistema de Informação Geográfica à escala a determinar no âmbito do Projecto, dos sistemas hidrogeológicos e da recarga regional de aquíferos;

2.5 - elaboração da primeira base de dados hidrogeológica das ilhas seleccionadas.

Fase 3 - Mapeamento da vulnerabilidade DRASTIC das ilhas seleccionadas de acordo com a metodologia apresentada no Capítulo Segundo e utilização dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) do LNEC e das outras instituições participantes, para tratamento dos parâmetros anteriormente descritos, a partir das fórmulas e com os pesos apresentados no método DRASTIC, e obtenção do mapeamento DRASTIC da vulnerabilidade das águas subterrâneas das ilhas seleccionadas.

Fase 4 - Elaboração das conclusões e recomendações em relação ao conhecimento adquirido no âmbito do Projecto visando a caracterização e o mapeamento da vulnerabilidade de outras regiões costeiras continentais ou insulares da União Europeia e de África.

6.1.1.5 Participantes

Serão participantes potenciais no projecto o LNEC, o LREC Madeira, a Universidade dos Açores e as Direcções de Serviço de Recursos Hídricos e de Desenvolvimento de Cabo Verde e de S. Tomé e Príncipe e Laboratório de Engenharia da Guiné-Bissau, instituições com quem o autor estabeleceu já contactos directos em 1997, durante o 3º SILUSBA e em 1998, durante o "1st Inter-Regional Conference on Environmental-Water: Innovative Issues in Irrigation and Drainage", organizado pela Comissão Nacional Portuguesa da "International Commission on Irrigation and Drainage".

A equipa de trabalho deverá integrar técnicos com os seguintes perfis: engenheiros civis, geólogos e hidroquímicos com formação em estudos de águas.

6.1.2 Programa de Investigação P8 - MEDEA: MEDiterranean Environment Aquifers Sustainable management of coastal freshwater resources under socio-economic (urbanisation, tourism) development and climate

6.1.2.1 Considerações Gerais

Os principais objectivos do projecto de investigação P8 a desenvolver em Portugal, anteriormente apresentado, são os seguintes:

- análise de modelos numéricos para simulação e avaliação da intrusão salina em aquíferos costeiros;
- análise das situações de emergência para captações de águas subterrâneas, resultantes de acidentes de poluição, e programação das restrições matemáticas correspondentes;
- análise das situações de emergência para captações de águas subterrâneas, resultantes de sobreexploração, e programação das restrições matemáticas correspondentes;
- desenvolvimento de um modelo de optimização para determinação da melhor localização das captações de águas subterrâneas e o correspondente desenvolvimento de interfaces "*amigáveis*".

Neste Programa de Investigação P8-MEDEA além de se contar com a colaboração da Universidade de Coimbra (Instituto do Mar) contar-se-á ainda com a colaboração de Itália (que coordenará o projecto comunitário) e de países Mediterrânicos no âmbito da candidatura MEDEA a efectuar ao Programa de Investigação INCO-MED. Nesta secção apresenta-se a componente da proposta comunitária, a desenvolver em 1999, directamente em língua inglesa.

6.1.2.2 Objectivos do Projecto

Quantification of natural and "*man-induced*" groundwater recharge is an essential element in the assessment of possible effects of climate change on the distribution and management of water resources in semiarid coastal areas of the European Union (EU) and the Mediterranean Countries of Northern Africa (*e.g.* Morocco, Tunisia, Egypt, etc.) or of the Middle East (*e.g.* Israel). However, to date, there is no routine and accurate means of estimating such replenishment in complex hydrogeological systems. This project proposal thus aims to test, compare and further develop the spectrum of available techniques with particular reference to the case-study of a catchment scale water resources evaluation in the **Algarve** and/or **Lisboa e Vale do Tejo** Regions.

The programme will contribute to international demands for reliable quantitative information on semiarid coastal zone recharge estimation and the determination of its time and space variability in view of the assessment of any possible impact of modifications of the mean level of the sea due to climatic factors.

6.1.2.3 O Programa INCO-MED

Under the RTD OBJECTIVES, PRIORITIES AND DELIVERABLES for Co-operation with MEDITERRANEAN PARTNER COUNTRIES, priorities on Shared Cost Actions on "Coastal Management and Environment" seems to be included, in particular on:

- policy research on integrated coastal management, with emphasis on its utilisation for tourism;
- integrated policy and resource management on pollution prevention emphasising watersheds and the corresponding coastal zones, exploitation of aquatic biodiversity through fisheries and aquaculture;
- research on hydromorphology and dynamics with regard to river diversions, sedimentation, erosion and its implications for beach stability and construction and the corresponding hydrological impacts.

6.1.2.4 Programa de Trabalhos

The focus on the coastal environment will be the main priority of MEDEA Project, with an emphasis on watersheds and the corresponding coastal zone.

The general ideas for working areas will be the following:

1. **Work Area 1: Geological and hydrogeological characterisation of two selected coastal regions in southern Mediterranean (Israel and Morocco)**

a) Collection of hydrologic and geologic data for the selected regions and implementation of a GIS system to archive and manage the data sets.
b) Inventory of the water points and water reserves.
c) Implementation of monitoring and modelling tools for the assessment of **groundwater recharge**, with emphasis on the contributing hydrological catchment.

2. **Work Area 2: Characterisation and mapping of groundwater vulnerability in the selected regions**

a) Implementation of operational tools for the monitoring and **modelling of sea-water intrusion** with emphasis on the transition zone.
b) Inventory of the potentially hazardous domestic landfills in the area and implementation of monitoring and modelling tools for leachage control.
c) Quantification of the parameters and implementation of the DRASTIC methodology for groundwater vulnerability assessment.

3. **Work Area 3: Development of a comprehensive approach to the management of Mediterranean coastal aquifers under socio-economic development and climate change scenarios**

a) Optimisation of existing freshwater resources.
b) Definition of expected socio-economic scenarios with emphasis on tourism and urbanisation over selected time windows.

c) Identification of the environmental impact of such modifications on the management goals for freshwater resources and development of criteria for selection of operational alternatives.
d) Identification of the impact of possible climate change scenarios on the management goals for freshwater resources and development of criteria for selection of operational alternatives.

4. **Work Area 4: Development of recommendations and technical information support tools for dissemination of the methodology so as it can be valuable in other Mediterranean areas under similar conditions.**

a) Recommendations.
b) Development of vocational training tool.

6.1.2.5 Coordenador do Projecto

The University of Genova, Department of Environmental Engineering (Italy):

The tasks of the University of Genova will be equivalent to those recently developed within the AVICENNE HydroMed project, *i.e.* the development of a computerised methodology for the evaluation of the vulnerability of aquifers in the southern Mediterranean basin and its validation over two sample areas in Morocco and Israel in co-operation with LNEC.

6.1.2.6 Parceiro Mediterrânico Asiático

University of Haifa/Technion (Israel):

Tasks 1 of University of Haifa/ Technion (Israel) within the MEDEA-MED project: Management of a coastal aquifer with emphasis on the conditions typical in the mediterranean region:

Management of a coastal aquifer (with emphasis on the conditions typical in the Mediterranean region). Although an important element in this research will be the modelling efforts, we would suggest defining the proposed research as a comprehensive approach to management of a coastal aquifer. The objective is to develop a methodology, the required tools, and to apply/demonstrate both on a selected region. We suggest including:

Geophysical investigations to define the location of the interface/transition zone, monitoring system, geohydrological investigations to define the stratigraphy, setting up of a computerised database for all the hydrogeological and geochemical data and management data, (the database should be capable of interacting with models that describe flow ands solute transport in the aquifer), establishing the conceptual model, the mathematical and numerical model, working on both sharp interface and transition zone models, comparing them, identification of model parameters, model calibration, etc., establishing management scenarios (decisions are related to pumping (rates and spatial distributions) and artificial recharge (in case the aquifer is also used for seasonal and long-term storage, which is required under Mediterranean climatic conditions), setting management goals (social, economic, hydrological, etc.), criteria for selection of preferred alternatives, establishing a methodology for selecting preferred

alternatives (not a formal optimisation, but in the sense of comparison among proposed scenarios). Although University of Haifa direct interest is modelling seawater intrusion efforts, we suggest that we take a comprehensive approach to the management of a coastal aquifer problem. If we succeed in investigating and implementing a methodology, and provide the required tools, it will then be of value in other areas under similar conditions.

Tasks 2 of University of Haifa/ Technion (Israel) within the MEDEA-MED project: Management of domestic landfills.

Modelling a landfill with the objective of estimating the leachate: a model of flow and contaminant transport, with appropriate chemistry. What we have in mind is a comprehensive approach and demonstrating the methodology and tools on a relatively large selected landfill (possibly with a contaminant plume originating at the landfill).

We would like to include in such research from site characterisation of an existing landfill, a monitoring system in and around the landfill (inside the landfill, in the vadose zone, in the underlying aquifer, sampling fluids and gases, a database for all the data, capable of interacting with models, models of flow and transport in the landfill, including chemical and biological reactions, comparison of models, landfill construction, etc.

Other subjects are also possible, but I would first like to hear your reaction to the above two subjects.

6.1.2.7 Tarefas P1 do LNEC Projecto "Mathematical modelling concerning seawater intrusion"

Phase 1: Geological and hydrogeological characterisation of a selected coast region, inventory of the water points, characterisation of water reserves and application of the DRASTIC methodology for the characterisation and mapping of groundwater vulnerability.

DRASTIC vulnerability comes as a concept that allows the integration of different and relevant hydrogeological parameters that soundly characterise the underground media and its specificity. Each one of the seven DRASTIC parameters has been divided in ranges and classifications that influence the pollution potential.

The use of the DRASTIC method in Portugal required the development of a new groundwater recharge model programmed for regional assessment (*cf.* VERMEULEN *et al.*, 1993).

Phase 2: This phase contains also mathematical modelling concerning seawater intrusion, using a finite difference model and/or a finite element model, with the objective of simulate the aquifer situation on the future and evaluate the effect of the groundwater exploitation on a possible evolution of the freshwater/saline water interface.

Coastal aquifers constitute important sources for water. Many Portugal coastal areas are also heavily urbanised, a fact, which makes the need for fresh water even more acute.

This effect, in coastal regions with a less important or random water supply by superficial water, leaves to a gradual increase of groundwater use and consequently the progress of saltwater to the aquifer in some coastal regions and also to a less available freshwater supply.

The pumping in coastal aquifers creates a body of seawater, often in the form of a wedge, heavier, underlying the lighter freshwater. By intensive and prolonged pumping from a coastal

aquifer and if there is no compensation of the aquifer by natural or artificial groundwater recharge, the water table in the vicinity of the coast becomes less than the initial, and the phenomenon of seawater intrusion starts to develop.

The interface freshwater/saltwater may start to advance landwards and reaches inland pumping wells that became later contaminated.

Actually, the real situation is even more dangerous in view of the presence of a transition zone, rather than an abrupt interface. Because of this transition zone, an increase in salinity in a pumping well serves as a warning of the advancing salinization of the aquifer.

In such case, this makes the vicinity of seawater and of the contact zone freshwater/seawater a problem that requires special attention and appropriate management technical.

6.1.2.8 Tarefas P2 do LNEC Projecto "Optimization models for the best location of water well fields and the corresponding user-friendly software"

The main objective of this stage is to build optimization models for assisting decision-makers to manage drinking water system in emergency conditions.

These optimization models will permit to select the best location of well fields for different scenarios of accidental pollution contamination preventing major damages in the drinking-water supply systems. There are many different situations that could be analyzed.

Vulnerability maps developed in previous stages will provide the information about sites to be used in emergency conditions, optimization models will choose among those less vulnerable sites the best location for a well field to supply a given drinking water center considering different objectives (for example: minimizing costs associated with construction, installation, and operation of those devices, minimizing risk, etc.).

Finding solutions for this kind of models is a very complex task because of their mathematical properties. They are often highly non-linear and discrete models. Recent developments in the field of operations research, particularly in the field of the stochastic search methods, allow even very large real-world problems to be successfully solved. A heuristic based on the idea of simulated annealing will be developed. Annealing algorithms are probabilistic optimization algorithms that have proven to be very useful for problems formulated in discrete or combinatorial form. They use a descent strategy for searching optimal solutions, but allowing ascent moves in order to overcome major drawbacks of descent classical search methods of getting trapped in local optima.

Another potential tool to be used in the search of alternative strategies on the hydraulic control of the groundwater is a combined model of simulation and optimization. A common simulation/optimization approach to the joint solution of decision and forecasting problems is the response matrix approach (RM). In this model, an external groundwater simulation model is used to develop unit responses (or influence coefficients, or response functions). Each unit response describes the influence of a pulse stimulus (*e.g.* pumping for a brief period) upon hydraulic heads at points of interest throughout a system.

A response matrix is an assemblage of unit responses and is included in the optimization model. This model pretends to assign the best set of numerical values to decision variables related to the operation and development of the system: (1) to achieve certain goals and objectives; (2) while meeting a set of constraints; and (3) while keeping the control in each

interesting location and time of the variations undergone by the system state variables. The decision variables include the local stresses such as pumping or injection rates and may include hydraulic heads at the discretion of the modeler.

6.1.3 Programa de Investigação P3 - SADCC: Validação e verificação do desempenho de modelos de avaliação da vulnerabilidade à poluição de águas subterrâneas: Aplicação a países da UE e da SADCC

6.1.3.1 Enquadramento

Referiu-se anteriormente que se pretende desenvolver a proposta do Programa P3 tendo em vista uma parceria europeia (*British Geological Survey*, Reino Unido) e de outros países do Sul de África, eventualmente Moçambique (Universidade Eduardo Mondlane) e Angola (Universidade Agostinho Neto e Direcção Nacional de Águas) e seguramente África do Sul (*Council for Scientific and Industrial Research, CSIR*). O autor já estabeleceu contactos com as referidas instituições de investigação e universitárias desses quatro países, visando a elaboração desta proposta. A proposta do Programa de Investigação P3 - **Validação e verificação do desempenho de modelos de avaliação da vulnerabilidade à poluição de águas subterrâneas,** que se apresenta nesta secção, foi escrita directamente em língua inglesa.

6.1.3.2 Objectivos do Projecto

The primary objectives of this research are:

1. Evaluate groundwater vulnerability to nitrate pollution potential using the DRASTIC model.
2. Determine the spatial auto-correlation of nitrate detection in groundwater across the study areas to determine whether point or non-point sources are likely the cause of such pollution.
3. Validate the accuracy of the approach by comparing the vulnerability maps with existing well water quality data sampled across the state.

6.1.3.3 Revisão do Estado dos Conhecimentos

No Capítulo Segundo deste Programa é apresentada uma revisão sobre o tema vulnerabilidade das águas subterrâneas à poluição.

Further issues on these topics are addressed in NAVALUR and ENGEL (1997, *i.e. in* http://ncgia.ucsb.edu/conf/SANTA_FE_CDROM/sf_papers/navulur_kumar/my_paper.html).

According to NAVULUR and ENGEL (1997), regional scale analysis identifying the problem areas of nitrates leaching from agricultural management systems will aid in efficient groundwater management strategies. Those authors developed a project aiming a preliminary screening analysis to evaluate the vulnerability of groundwater systems of Indiana, USA, to nitrate pollution was carried out using a modified DRASTIC and SEEPAGE analysis at 1:250,000 scale (*cf.* Fig. 2.15). The accuracy of the results from the above analysis was statistically evaluated by comparing the results with groundwater quality data sampled across the state. The authors stated that the comparison showed a correlation coefficient of 0.67 and showed that these regional scale analyses show a great deal of potential as screening tools for policy decision making in groundwater management.

Groundwater models such as SEEPAGE and DRASTIC can be applied on a regional scale to develop such maps. The data layers required for these models are commonly available data such as pH, organic matter content, etc. For most states, the statewide groundwater vulnerability maps using DRASTIC were produced from 1:2,000,000 scale data (ALLER *et al.*, 1987). **The USEPA (1992) found that these maps did not correlate well with the water quality analysis performed for the national survey of pesticides in drinking water wells. More detailed and accurate maps are needed by states to implement groundwater management programs** (*cf.* Fig. 2.16).

While regional scale models can be developed using the commonly available data, field scale models require detailed inputs to model contaminant transport in the root zone and are helpful in investigating areas of high vulnerability from the regional scale maps. These will also be helpful in suggesting the conservation practices that can mitigate the pollution. GLEAMS (*cf.* NOVO and LOBO-FERREIRA, 1990), NLEAP, LEACHMN, and CMLS are such models that can consider detailed inputs like evaporation and management practices for estimating the leaching potential of the nitrates. These models can be applied to study areas of disagreement in the regional scale vulnerability maps with water quality data samples.

The Geographic Information Systems (GIS) environment is being widely applied for diverse fields in resources management and other areas. It offers the facilities to store, manipulate and analyze data in different formats and at different scales. Integration of groundwater quality assessment models in a GIS will allow use of these models for different scenarios (management practices, land uses, etc.).

Regional scale groundwater vulnerability studies to nitrate pollution from non-point sources using DRASTIC and SEEPAGE analyses were conducted at the 1:250,000 scale for Indiana (*cf.* Fig. 2.15). These models were integrated with the ARC/Info GIS environment. DRASTIC and SEEPAGE analysis have categorized most of the Indiana aquifer systems as moderately vulnerable to pollution. Additional data layers, land use and fertilizer usage, were considered in DRASTIC and SEEPAGE in an attempt to improve the results. The results from conventional and modified DRASTIC and SEEPAGE analyses were compared with the nitrate detections in well water quality samples across the states. **The results indicated that the models performed well in predicting the sites with high and very high nitrate detection.**

Statistics, Geary ratio and Moran coefficient were computed to assess the spatial auto-correlation of nitrate detection. The results indicated that spatial correlation exits between the occurrences of nitrate pollution. This suggests that regional-scale factors and processes be of importance and indicating that non-point sources of nitrates are important to the quality of groundwater.

The modified DRASTIC and SEEPAGE analysis show a great deal of potential as screening tools for policy decision making in groundwater management. **These analyses should not be used to replace detailed studies but should be applied to screen areas of high and very high** vulnerability that a site-specialist should concentrate on. Including additional data showing the excess amount of nitrate applied, crop rotations can further modify these analyses, and livestock nutrient value applied to farms. It is anticipated that this will improve the accuracy of the vulnerability estimates.

GIS are an effective tool for carrying out groundwater vulnerability studies. The integration of the groundwater quality models within the GIS environment results in easy implementation of the analyses for different agricultural management practices. Automated data extraction to

develop data layers required for the DRASTIC and SEEPAGE analysis from the STATSGO database will enable analysis for the whole Unites States at a 1:250,000 scale. When more data becomes available, the field scale simulations of more detailed models like NLEAP can be used for regional scale studies. It is anticipated that the studies on the spatial and scale variability of inputs on field scale models will lead to specific criteria with regards to level of detail of inputs required for conducting regional scale analyses.

In the work of NAVULUR and ENGEL (1997), the data layers of the hydrogeologic settings were assigned the corresponding ratings (*cf.* Tables P3-1 and P3-2) and were converted from vector to raster layers in ARC/Info. A Graphical User Interface was developed using the form menus in ARC/Info for carrying out the analyses. The DRASTIC and SEEPAGE analyses were modified by considering the additional data layers land use and fertilizer usage. The agricultural statistics were used to extract the crop information (type of crop, yield, harvest date, etc.), and the fertilizer applied on a county scale. Based on the crop N uptake and N content of fertilizer, the excess fertilizer applied on farmland was computed for the state. The DRASTIC Index map and SEEPAGE Index Number (SIN) map were reclassified into four categories according to Tables P3-1 and P3-2: low, moderate, high and very high.

Table P3-1: Reclass Table for Modified DRASTIC Ratings

DRASTIC Index	Low	Moderate	High	Very High
Values	1-140	141-180	181-230	230

Table P3-2: Reclass Table for Modified SEEPAGE Ratings

SEEPAGE Index	Low	Moderate	High	Very High
Values	1-89	90-144	145-209	210

The DRASTIC and SEEPAGE analyses were carried out in ARC/Info, to create the GIS layers shown in Chapter Two, Fig. 2.15. The modified techniques considering the additional data layers land use and fertilizer usage was carried out in the grid sub module. The results from the conventional DRASTIC model indicate that 58% of the groundwater systems in Indiana fall under the moderate vulnerability category and 23% under high and very high pollution potential. There was a 24% increase in the areas categorized as low vulnerability using the modified DRASTIC approach. The conventional SEEPAGE approach predicted around 75% of the state having moderate vulnerability and considering the additional datalayers land use and fertilizer usage did not change the predictions. Both models predicted 50% or more of Indiana aquifer systems to have moderate vulnerability ratings.

The results from the conventional and modified DRASTIC and SEEPAGE approaches were compared with the database containing observed nitrate detection in wells. The conventional DRASTIC and SEEPAGE models predicted 80% of the high and very high vulnerable areas correctly. There was a 20% increase in accuracy in predicting low vulnerability areas using the modified DRASTIC technique. The consideration of additional data layers in SEEPAGE did not improve the accuracy of predictions. The results from the modified DRASTIC and SEEPAGE analysis were compared with the results from conventional DRASTIC and SEEPAGE analyses (*cf.* Tables P3-3, P3-4, and P3-5).

Table P3-3: Comparison of Conventional DRASTIC Ratings with Observed Nitrate Detection

	DRASTIC Ratings			
Observed	**Low**	**Moderate**	**High**	**Very High**
Low	25	146	138	0
Moderate	1	17	63	0
High	0	2	18	2
Very High	0	2	2	1

Table P3-4: Comparison of Modified DRASTIC Ratings with Observed Nitrate Detection

	Modified DRASTIC Ratings			
Observed	**Low**	**Moderate**	**High**	**Very High**
Low	86	85	138	0
Moderate	7	11	63	0
High	0	1	20	1
Very High	0	2	2	1

Table P3-5: Comparison of Modified SEEPAGE Ratings with Observed Nitrate Detection

	Modified SEEPAGE Ratings			
Observed	**Low**	**Moderate**	**High**	**Very High**
Low	9	183	117	0
Moderate	2	22	57	0
High	0	2	20	0
Very High	0	2	3	0

The Pearson Correlation Coefficient (r) was computed as 0.61 between conventional DRASTIC predictions to the observed nitrate detection. The addition of data layers land use and fertilizer application improved the r-value to 0.67. DRASTIC and SEEPAGE ratings were generally conservative in prediction. The areas predicted to have low vulnerability but which had observations of high or very high nitrate concentrations are of concern and are being investigated further. Such high observations of nitrates may be the result of point sources.

Using SAS (Statistical Analysis Software) was used to carry out regression analysis on all the possible combinations of DRASTIC factors including the additional data layers to determine the best possible combination that predicts the nitrate detection accurately. The aquifer recharge data layer was found to have the least significant effect on nitrate detection and could be dropped from the model. This is largely due to the relatively small difference of this parameter within the study area. Studies are also underway to perform sensitivity analysis on the weights assigned to each of the factors.

6.1.3.4 Metodologias para Validação e Verificação do Desempenho de Modelos de Avaliação da Vulnerabilidade

1. Developing the Data Layers

The hydrogeologic parameters required for the analysis will be identified from database (*e.g.* INVENTAR) tables and map layers for each of the layers were created using database management tools in ARC/Info.

2. Spatial Correlation Studies to Eliminate Point Source Pollutants

Spatial auto-correlation refers to the spatial ordering of a single variable and to the relationship between pairs of observations of this variable. The ordering of n observed values of some variable X is usually described with the aid of a connectivity matrix, C. Non-zero cij entries in the n x n matrix indicate that the corresponding polygons are juxtaposed. For data measured on an interval/ratio scale the statistics Geary ratio and Moran coefficient can be used (GRIFFITH, 1987).

3. Geary Ratio

The Geary Ratio is an index for interval/ratio data that is based upon paired comparisons of juxtaposed map values. It may be calculated as:

$$GR = \frac{(n-1)\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} c_{ij}(x_i - x_j)^2}{2\left(\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} c_{ij}\right)\sum_{i=1}^{n}(x_i - x)^2}$$

The meaning of this index is fairly straightforward: as similar values tend to clump together (cij = 1), then the Geary ratio approaches to zero. If dissimilar values tend to clump together, the Geary ratio approaches 2.

4. Moran Coefficient

Another index for interval/ratio based data is Moran Coefficient and may be calculated as:

$$MC = \frac{n\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} c_{ij}(x_i - x)(x_j - x)}{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} c_{ij}\sum_{i=1}^{n}(x_i - x)^2}$$

The expected value of MC is (-1/n-1). For similar values in juxtaposition, MC-> 1 and for dissimilar values in juxtaposition, MC - > -1. As the Geary ratio deals with paired comparisons, the Moran coefficient deals with covariations.

As the DRASTIC and SEEPAGE analysis predicts vulnerability from non-point source pollution, it was desirable to eliminate detection due to point source pollution. The water quality data containing the nitrate detection in well sites was imported as a point coverage into ARC/Info and Thiessen polygons were created for the point coverage. The spatial auto-correlation statistics, Moran Coefficient and Geary Ratio were computed for the datasets. The Moran Coefficient value was computed as 0.79 and Geary Ratio as -0.06 which indicated that a spatial correlation exists among the detects. It is assumed that computation of these spatial statistics for different combinations of nitrate detection will help in detecting values that significantly affect the Geary Ratio and Moran Coefficient, which might be an indication of point source pollution.

5. Validation of the Accuracy of the Regional Scale Vulnerability Maps

The DRASTIC results will be compared with nitrate detection in selected well sites sampled across the case-study areas, in Portugal in the Tagus and Sado aquifer, based on the data gathered in the campaign carried out during October and November 1998 (*cf.* LOBO-FERREIRA *et al.* 1999a). The nitrate detection will be categorized into four categories: Low 0-5 ppm; Moderate 5-12.5 ppm; High 12.5-25 ppm; Very high 50 ppm. As the well water quality samples for nitrate detection were not uniformly distributed across the region, the DRASTIC vulnerability ratings at the corresponding sites will be extracted and compared with the nitrate detection in the well water quality database, according to the methodology presented above.

In Portugal, additionally, a comparison of the results obtained with the DRASTIC method for the Tagus and Sado aquifer will be made with those obtained by geoelectric logs by GONÇALVES and ANDRADE AFONSO (1998) in their study on "Geophysics for the Protection of Water Resources: Mapping of Risk Areas in the Tagus-Sado Valley using Geoelectric Logs".

6.2 Países da América Latina: Brasil

6.2.1 Programa de Investigação P1+P10-BRASIL - Estudos de calibração de métodos de avaliação da recarga regional de aquíferos e optimização da exploração de águas subterrâneas: Aplicação ao Nordeste Brasileiro

6.2.1.1 Enquadramento

Dos Anais do 2º SILUSBA destacam-se as recomendações de COSTA e COSTA FILHO (1995) para um **Programa de Aproveitamento das Águas Subterrâneas no Semi-Árido Nordestino:**

O programa para aproveitamento adequado das águas subterrâneas no semi-árido nordestino, envolverá, dentre outras, as seguintes acções:

- *cadastramento de todas as obras de captação;*
- ***realização de estudos hidrogeológicos a nível de detalhe, visando avaliar precisamente as reservas e recursos exploráveis;***
- *recuperação de poços abandonados, com instalação, quando for necessário, de equipamento de dessalinização da água;*
- *monitoramento da exploração dos aqüíferos visando a sua proteção e preservação e quantitativa;*
- *perfuração de poços profundos em bacias sedimentares e aqüífero físsural e poços depósitos sedimentares de pouca espessura;*
- *realização de estudos e posterior implantação onde recomendável, de barragens subterrâneas e de barragens de assoreamento;*
- *desenvolvimento de campanha de esclarecimento público acerca da correta utilização das águas subterrâneas, evitando desperdícios e depreciação de aqüíferos;*
- *implantação de leis que assegurem o controle do uso e conservação dos mananciais subterrâneos;*
- ***zoneamento qualitativo e quantitativo dos aqüíferos; e***
- ***planejamento do uso racional dos recursos hídricos subterrâneos.***

6.2.1.2 Objectivos do Projecto

Este Programa de Investigação será baseado nos Programas de Investigação P1 e P10 apresentados anteriormente para Portugal e para alguns PALOP. Será feita uma adaptação dos objectivos do projecto em função das necessidades de investigação tão bem esquematizadas anteriormente por COSTA e COSTA FILHO (1995) para um **Programa de Aproveitamento das Águas Subterrâneas no Semi-Árido Nordestino.** No Projecto dar-se-á relevo aos seguintes temas:

- ***realização de estudos hidrogeológicos a nível de detalhe, visando avaliar precisamente as reservas e recursos exploráveis;***

- ***zoneamento qualitativo e quantitativo dos aqüíferos;***
- ***planejamento do uso racional dos recursos hídricos subterrâneos.***

6.2.1.3 Proposta a Enviar à Comissão Europeia

Apresenta-se em seguida um resumo da proposta a enviar ao Programa Comunitário INCO-DEV:

1) *Project objectives: The purpose of this project is to use, test and compare a variety of techniques for estimating the recharge to groundwater, including in semi-arid regions, in mixed and complex systems. This will take place in the context of water resources evaluation, will show which methods are suitable, and will quantify their accuracy at the catchment scale.*

2) *Field areas in Brasil and in Portugal: (i) The semi-arid, hydrogeologically complex region of the Brasilean Nordeste will be selected. Within this region recharge estimates will be made for an area to be selected, possibly in* ***Pernambuco*** *and* ***Bahia****, in co-operation with the* ***Universities of Recife and of Salvador****. Both states require recharge estimation approaches as appropriate to the varying dominant natural processes of water transmission. (ii) In Portugal, the* ***Tejo and Sado rivers valleys*** *in the Lisboa e Vale do Tejo Region and the Algarve Region, will also be selected due to the availability of data, collected during a project developed by* ***LNEC*** *(National Laboratory for Civil Engineering) for the European Commission, on vulnerability assessment of groundwater to pollution, aiming the apllication of the proposed metodologies in a EU Member-state.*

3) *Methods to be examined: (i) The following methods of point recharge estimation will be reviewed and may be used as appropriate to each terrain: chloride (chemical and 36 Cl) profiling, tritium injection (as permitted by local regulations), soil physics measurements and soil moisture balances (regional mathematical modelling of sequential daily water balance). Areal (catchment scale) methods will include basin discharge, natural and artificial tracer transit times and catchment modelling. Recharge due to urbanisation and irrigation will be estimated by water balance and tracer techniques. Results from each method will be tested and compared, principally by way of integrated subsystem groundwater flow models containing all major lithologies and landforms. (ii) After the regional assessment of groundwater recharge is concluded, for Algarve and/or for Lisboa e Vale do Tejo areas, by the use of methods described above, the calibration and validation of a regional groundwater recharge mathematical model, recently developed in LNEC, will be performed aiming the evaluation of mean, seasonal and/or monthly groundwater recharge values.*

(a) *Mobilisation: This includes a reconnaissance visit to the Algarve and/or Lisboa e Vale do Tejo will lead to final site selections for long-term monitoring, installation designs, purchase (or hire) of monitoring equipment and its installation.*

(b) *Data collection: The bulk of fieldwork for both recharge estimation and modelling falls in this component and must cover two recharge 'seasons'. Included are: well inventories (ca. 500) for water balance, piezometry and hydrochemistry; drilling and borehole pumping test analyses for aquifer geometry, boundaries and properties; chloride and environmental isotope profiling in the unsaturated zone; inventories of urban and irrigation water balances.*

(c) Long-term monitoring: Repetitive data collection and continuous monitoring of several variables are necessary to satisfy the time and spatially variable input demands of ultimate subsystem flow models. Included as components of overall data base development, on the basis of hydrogeological/hydropedological units, will be: surface streamflow, selected well piezometry, extraction and hydrochemistry, principal spring discharges, unsaturated zone profiling (chloride, isotope), dryfall/precipitation chloride and basic meteorological data.

(d) Analysis and modelling: Data and laboratory analyses will proceed concurrently with (b) and (c). Recharge model development and testing (e.g. soil moisture balance), (sub) catchment water balances and subsystem groundwater flow), as appropriate to each area.

6.2.2 Programa de Investigação P7 - MERCOSUR - interacção águas superficiais-águas subterrâneas. Estudo de alternativas de tratamento de solos e de águas subterrâneas contaminados por metais pesados. Ensaios de laboratório e implementação numa área contaminada

6.2.2.1 Enquadramento

Foi estabelecido pelo autor durante o 2º SILUSBA, realizado no Recife, em Novembro de 1995, em simultâneo com o XI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, co-organizado pela Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH) e pela Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos (APRH), contactos com professores universitários brasileiros visando a elaboração de propostas de projectos co-financiáveis pela Comissão Europeia, Programa INCO-DEV.

Paralelamente foi elaborada pelos Doutores José Azcue e Teresa Eira Leitão, do LNEC.DH.GIAS, e financiada pelo Instituto de Cooperação Científica e Tecnológica Internacional (ICCTI) do Ministério da Ciência e da Tecnologia de Portugal uma candidatura de intercâmbio científico no âmbito do Convénio ICCTI/CONICYT (Comissão Nacional de Investigação Científica e Tecnológica do Chile) intitulada "**Estudo das alternativas de tratamento de solos e sedimentos contaminados por metais pesados. Ensaios de laboratório e implementação numa área contaminada**".

6.2.2.2 Objectivos do Projecto

Constituem principais objectivos do projecto que se propõe os seguintes aspectos:

1. Caracterização da qualidade das águas subterrâneas e análise do comportamento dos seus elementos químicos em regiões de estudo a seleccionar no Brasil (eventualmente no Pantanal), no Chile (eventualmente na bacia do rio Alhue) e em Portugal (eventualmente na região de Coruche);
2. Análise da vulnerabilidade e do risco à poluição das águas subterrâneas das regiões de estudo a seleccionar;
3. Análise da problemática relacionada com a interacção águas superficiais - águas subterrâneas nas regiões a seleccionar;
4. Monitorização e determinação da qualidade química das águas intersticiais na zona não-saturada do solo com vista a determinar o papel desempenhado pelo subsolo na retenção e/ou transformação de poluentes;
5. Estabelecimento de medidas a adoptar para a protecção dos recursos hídricos subterrâneos;
6. Definição das metodologias de reabilitação mais adequadas a implementar, considerando as diversas situações.

6.2.2.3 Resumo da Componente N.º 1 do Projecto

A metodologia a adoptar para o desenvolvimento da Componente N.º 1 será a apresentada no Programa de Investigação P7 intitulado *Interacção qualitativa águas superficiais - águas subterrâneas: Aplicação ao Caso de Estudo dos Campos da Golegã no Paúl do Boquilobo.* Assim para a região de Coruche (Portugal), do Pantanal (Brasil) e de Alhue (Chile) far-se-á o seguinte:

a) Caracterização da geologia e da hidrogeologia das regiões em estudo (em Coruche na Estação Agronómica Nacional) dos fenómenos relacionados com os aspectos qualitativos das águas subterrâneas.

b) Levantamento das potenciais fontes de poluição das regiões de Coruche (Portugal), do Pantanal (Brasil) e de Alhue (Chile):

   - análise dos principais processos de utilização agrícola do solo das regiões em estudo, com especial atenção para o uso de nitratos e de pesticidas, e ainda à rejeição e identificação dos locais de rejeição e efluentes urbanos e industriais, volumes rejeitados (se possível), bem como a área afecta à sua libertação;
   - análise das características dos poluentes;
   - análise do potencial comportamento dos poluentes no subsolo.

c) Caracterização do risco de poluição da região de Coruche, através da junção dos resultados da vulnerabilidade apresentada para a região em LOBO-FERREIRA *et al.* (1999b, Figs. 2.12 e 2.13) e dos focos de poluição identificados.

d) Monitorização e caracterização da qualidade das águas subterrâneas das regiões de Coruche (Portugal), do Pantanal (Brasil) e de Alhue (Chile):

   - Propõe-se que a caracterização da qualidade das águas subterrâneas seja realizada com base na recolha de dados em poços e/ou furos.
   - A recolha de dados hidrogeoquímicos e a amostragem de águas subterrâneas serão desenvolvidas, em duas campanhas de amostragem, com cerca de seis meses de intervalo.

e) Indicação das medidas genéricas a adoptar para a protecção dos recursos hídricos subterrâneos das regiões de Coruche (Portugal), do Pantanal (Brasil) e de Alhue (Chile).

6.2.2.4 Componente Específica do LNEC

A componente Específica do LNEC insere-se num âmbito mais geral de protecção ambiental das águas subterrâneas à poluição, mas incidindo em especial no domínio intermédio entre o solo e as águas subterrâneas, a zona vadosa do solo.

Nos estudos de avaliação ambiental da poluição nas águas subterrâneas podem considerar-se três domínios fundamentais de investigação a analisar: 1) a zona superficial do solo; 2) a zona não-saturada do solo e 3) a zona saturada do solo denominada aquífero. Em Portugal, à semelhança de outros países, têm sido desenvolvidos numerosos trabalhos no sentido de monitorizar a qualidade química das águas subterrâneas e dos solos com vista a avaliar a qualidade destes recursos essencialmente para consumo, no caso das águas subterrâneas, e para utilização na agricultura, no caso dos solos.

Nos trabalhos de investigação desenvolvidos no domínio da poluição dos solos e das águas subterrâneas tem-se vindo a desenvolver uma análise paralela destes dois meios no sentido de avaliar não apenas o estado de poluição de uma região mas também estudar a evolução dos poluentes desde que surgem à superfície dos solos até à sua migração para as águas subterrâneas.

A zona não-saturada do solo surge assim como a zona intermédia entre o domínio solo e as águas subterrâneas sendo muitas vezes o domínio responsável pela transformação e/ou retenção de poluentes.

Neste projecto propõe-se monitorizar e avaliar o estado de poluição da zona não-saturada e estudar a sua importância nos fenómenos de propagação de poluentes no solo e subsolo, tanto em ensaios laboratoriais como de campo, tendo-se para o efeito contactado já a Estação Agronómica de Coruche e reservado uma área experimental para o projecto de 4 x 4 m^2.

6.3 Países da Ásia: ASEM

6.3.1 Programa de Investigação P6 - China: In situ rehabilitation of polluted aquifers. Optimisation of methodologies

6.3.1.1 Enquadramento

O problema de excesso de nitratos nas águas subterrâneas causado por práticas agrícolas incorrectas não é exclusivo de Portugal. Como se referiu anteriormente, estudos sobre a evolução da concentração de nitratos em águas subterrâneas, efectuados por diversos países da Europa e pelos Estados Unidos têm verificado a sua presença em teores excessivos, com tendência para aumentarem (Van der HOEK e KLAPWIJK, 1987; HAMON e FUSTEC, 1991; HISCOCK *et al.* 1991 e DAHAB, 1991).

Visando alargar as possibilidades de financiamento e de criação de uma parceria internacional propõe-se neste Programa de Investigação a extensão da investigação a desenvolver no âmbito do Programa de Investigação P6 - **Desnitrificação *in situ* de aquíferos poluídos com nitratos**, por financiamento do Programa INCO-DEV. O autor teve reuniões de trabalho sobre esta proposta com o Prof. Sèrge Cescotto, da Universidade de Liège, Bélgica, que coordenará a sua apresentação da candidatura à DGXII, bem com o Prof. Jiti Zhou, do Environmental Engineering Institute, da Universidade de Dalian, China. Também já confirmou a sua participação a Universidade de Nanjing, China, que apresentou o seguinte perfil:

Nanjing University, one of the most famous key comprehensive universities in China, is an important center for academic research providing a good environment for teaching and research. With its strong research forces and advanced research facilities, the University has achieved remarkable results. According to the statistics of China's Scientific and Technological Information Institute, Nanjing University is a leader among the nation's universities in the entries of SCI, ISR and ISTP, the world authoritative scientific research paper indexes. Moreover, Nanjing University takes an active part in international academic exchanges. The University's links with over 70 universities and research institutions abroad has opened up channels for joint personnel training and cooperative scientific research.

O perfil que a Universidade de Dalian enviou é o seguinte:

Dalian University of Technology was found in 1949 and is one of the National Key Universities of China. There are 28 doctoral programs and 60 master programs in the 6 Colleges and 13 Departments. The College of Chemical Engineering is one of the important teachings and researching centres and Environmental Science and Engineering Department was born from this College. Combined with all the other research groups, which concern the environmental science and technology, Environmental Engineering Institute was formed and much competent research work was carried out. There are 15 professors and associate professors that activated at environmental management, environmental economy, environmental systematic analysis, environmental engineering, environmental microbiology, environmental chemistry, air pollution control, environmental monitoring, and environmental hydrology.

A proposta é apresentada directamente em língua inglesa.

6.3.1.2 Antecedentes

Per capita average water resource of China is only one-fourth that of the world. Furthermore, there is maldistribution of water in China. So the water resource is quite insufficient. In recent years, along with the rapid development of economy in the wake of China's open policy, more and more surface waters and ground waters have suffered from serious pollution due to the discharge of wastewater, use of pesticide, landfill disposal of solid waste and others. The deficit of water resource becomes an important limiting factor of the sustainable economic development, and it brooks no delay to control pollution and legitimately utilise limited water resources. Since it is quite difficult to monitor and control groundwater pollution because of the concealment and complexity of groundwater movement, more attention should be paid on the protection of groundwater environment.

Currently, groundwater pollution mainly results from the use of pesticides, oil leak of underground petroleum pipelines, and organic contaminant seepage from landfill site and so on. Thus the study on the environmental behaviours, ecological effects, effects on local socioeconomy, risk assessment, monitoring and pollution forecast, and pollution control techniques and policy of toxic organic contaminants in regional groundwater is a key problem for the planning, protection, pollution control and management of groundwater environment.

6.3.1.3 Tarefas da Universidade de Nanjing no Projecto

A Universidade de Nanjing desenvolverá os seguintes aspectos:

- *The scheme concentrates on human health impact of pollutants, while close attention is also paid to the potential ecological effects of contaminants. The study on ecological risk assessment is becoming, more and more important in China.*

The main contents of the proposed project are as follows:

1. Ecological effects of groundwater organic pollution in studied area:

- *systematically study the ecological effects of groundwater organic pollutants on regional ecosystem;*
- *focus on the study of uncertainty analysis and quantitative risk characterisation, and develop extrapolation techniques.*

2. Effects of groundwater organic pollution on the regional society and economy development:

- *study the economic conditions in the studied region before and after the organic pollution of groundwater and reveal the intrinsic cause of the changes in the regional economy.*
- *study and analysis of the economic conditions in the studied region before and after the treatment of groundwater organic pollution, and make regional economic impact evaluation of groundwater pollution control rationally.*

3. Regional monitoring scheme and warning system of groundwater organic pollution

Since the monitoring of the groundwater quality is the most basic method for groundwater resource protection, one task of the project is to make the optimal planning of the pollution

monitoring network, to develop the zero water pollution warning system and to search for suitable management plans.

4. Regional pollution control techniques and water quality management policy of groundwater

On the basis of the above research work and the characteristics of groundwater organic pollution and regional socioeconomic conditions, set the scientific standards of groundwater quality, study new treatment techniques and propose relevant water quality management policy.

6.3.1.4 Tarefas da Universidade de Dalian no Projecto: "The relationships of human health and its comprehensive media in different countries"

Introduction

"No health person, then there is no health development" is quoted from the Proposal of 21st Century issued on the International Conference of Environment and Development in 1992. This concept can go back to 1869. Massachusetts Board of Health announced then that "We believe all citizens have an inherent right to the enjoyment of pure and uncontaminated air and water and soil; this right should be regarded as belonging to the whole community; and that no one should be allowed to trespass upon it by his carelessness or his avarice or even his ignorance". It is clearly that the common sense of human being is pursuing health and living in the health environment, for example, enjoying the health food, drinking health water, and getting health air. While, what is the standard (index system) of health? What is the health environment? Can we define them quantitatively? How can we get the health food and other leaving materials? How can we keep the environment from being polluted? This proposal will deal with the measures to look for the answers of those questions.

Diagram of the Research

- human health standard (of different persons in different environment) by system index;
- health environment standard (health food, health water, health air, health living condition);
- the predominant mechanisms of the health influence by the different factors;
- the fate of the pollutants (or factors) in the different media;
- the concept or guides of environmental friendship materials development;
- the comprehensive policy concern the health (set up the Health Index System).

Methodology

1. Research Site Selection
   - Europe: big city; middle city; countryside;
   - China: big city; middle city; countryside.
2. Groups of Person: workers
   - peasant;
   - businessman;
3. Health standard investigation:

- physical index: height, weight, force/weight, life time, food supply;
- mental index: happiness, time of entertainment, book to be read;
- medicine index: hospital/persons, medicine care/persons, medicine facility/persons, medicine production/persons;
- other indexes.

4. The Health Environmental Investigation:
   - food (quantity, quality, physical chemical properties, biological properties);
   - water (quantity, quality, physical chemical properties, biological properties);
   - air (quantity, quality, physical chemical properties, biological properties);
   - Soil (quantity, quality, physical chemical properties, biological properties);
   - living condition (quantity, quality, physical chemical properties, biological properties);
   - sanitation (quantity, quality, physical chemical properties, biological properties).
5. The analysis of the mechanism of these factors to human health:
   - physical effects;
   - chemical effects;
   - mental effects.
6. The fate of predominant pollutants (or factors) in the different media which will influence the health of human:
   - food (production process, making process, storage);
   - chemicals (production, application, duration);
   - media (air, water, soil, others...).
7. The concept of health food, health chemicals, health media and their sustainable development:
   - the relationship between the "health media" and health food;
   - the relationship between the health chemicals and health media;
   - the sustainable development and human health.

6.3.1.5 Tarefas da Universidade de Liège no Projecto: " Environmental Behaviour and Its Prediction Model of Toxic Organic Pollutants in Non Saturated Zones in the Studied Area"

A Universidade de Liège, além de coordenar o projecto, participará cientificamente desenvolvendo o tema ***Environmental behaviour and its prediction model of toxic organic pollutants in non saturated zones in the studied area,*** que será dividido nas seguintes tarefas:

- *Study the loading process (including the effects of seepage loss for chemical fertiliser and pesticide used in the farmland with irrigation drainage system, continuous leakage of petroleum contaminants from underground pipes, percolation in the landfill site and so on), speciation processes-transport processes such as precipitation-dissolution,*

transformation processes such as hydrolysis, reduction-oxidation and biodegradation, and bioaccumulation of organic pollutants in the unsaturated aquifer.

- *Take the effects of groundwater hydrodynamics characteristics into account and establish the model predicting the environmental behaviour of organic pollutants in ground water.*

6.3.1.6 Tarefas do LNEC no Projecto: "Flow in unsaturated porous media: laboratory tests and mathematical modeling of infiltration and water flow"

Abstract

This project is focused on the analysis and optimization of *in situ* denitrification technologies for removing nitrate from soils and aquifers. This project is intended to give a valuable contribution for improving the application of the technologies presently in development to remove the nitrate from aquifers. These objectives would be achieved by verifying the applicability of different methodologies for different hydrogeological situations and for waters with different geochemical characteristics.

Groundwater contamination by nitrate has become one of the most important environmental problems that seems to be increasing, being presently one of the main threats to mantaining the water quality standards in many countries all over the world.

Several studies on the nitrate concentration in groundwater have been carried out in both European countries, and in the United States. These studies show a significant percentage of the wells with increasingly high nitrate levels (Van der HOEK and KLAPWIJK, 1987; HAMON and FUSTEC, 1991; HISCOCK *et al.* 1991 and DAHAB, 1991). In Portugal, the nitrate concentration in groundwater is also a matter of concern. LOBO-FERREIRA *et al.* (1994 and 1999), have analysed, respectively, the situation of nitrate pollution in groundwater for Mainland Portugal, and in Tagus Valley. In that study several situations are pointed out as being a threat to consumption. According to this study, the nitrate problems result mainly of diffuse pollution, caused by deficient agricultural practices, but also by the cattle raising industry (LOBO, 1993). In the Azores Region there are also recognised groundwater pollution problems by nitrate, caused by the lixiviation of nitrogen compounds of agriculture origin and cattle feed lots, for several islands of the archipelago.

It is expected that this type of pollution suffers a future increase caused, not only by the introduction of new sources, but also by the nitrate present in the soil that will be partially lixiviated to the groundwater. In this sense, it is important that global measures will be taken in order to combat this groundwater pollution problem.

In this work several different processes will be used to induce the **denitrification**. This will test the adequability of the different types of application, the optimal values for the carbon source to be added, and the proper physical and chemical conditions to develop the process. The aim is to analyse the performance of the technologies used for different hydrogeological, physical, chemical and biological conditions, in order to analyse its versatility for the different situations. For that purpose, **two different areas of study**, with different hydrogeochemical characteristics, containing excess of nitrate will be selected.

The project will mainly consist in the experimental *in situ* denitrification work. Through it, we expected to evaluate, by comparing with previous studies in the domain, the global and general for different geological areas.

1 PROJECT AIM

The state-of-the-art in technologies for *in situ* nitrate removal show that denitrification is the most adequate process at the moment. Nevertheless, many uncertainties still exists in what concerns the following aspects:

1. type of media where the desnitrification is possible (*i.e.* fractured, porous and carstic media), and the physical, chemical and biological conditions more adequate;
2. the desnitrification process itself - namely in optimizing the energy source for a better development of the process, pH more favourable, etc.;

This study it intended to give some contribution to the development of this technologies throughout the quantification of the parameters related to the hydrogeological media, and the desnitrification process variables.

The experience gathered will be afterwards analysed and compared with other experiments in order to extrapolate, if possible, general conclusions. With this study, an optimisation of the organic content in the injection water, the pH values and the oxygen concentration will be determined for the case studies. It is intended to be studied the adequability of the physical conditions as well as the flow regime and the hydrogeology where the experiments will be carried out.

It is also intended to study the optimal procedure to be carried out in order to avoid clogging of the area around the well caused by the excessive formation of organic matter and gases. This aspect is currently one of the main issues that restrains the performence of this technologies application *in situ*.

2 STATE-OF-THE-ART

Presented in the Portuguese part of this Proposal - Programa de Investigação P6.

3 PROJECT WORKING SCHEDULE

For a correct control of the *in situ* denitrification processes it is necessary to characterise, as completely as possible, the physical and chemical behaviour of the groundwater in natural conditions, *i.e.* before initialising the denitrification procedures. The aquifer analysis in equilibrium conditions allows us to detect the presence of the chemical and biological properties that can interfere in the process. In that sense, it is very important to have a coherent and complete conceptual model of the area to be treated in order to better control the overall process.

The project work programme, delineated according to the objectives proposed, was divided in three phases: (1) Phase I - Hydrogeological and hydrochemical characterisation, before the decontamination processes; (2) Phase II - Analysis and optimisation of the denitrification processes and (3) Phase III - Analysis of the aquifer behaviour at long term.

PHASE I - Hydrogeological and hydrochemical characterisation, before the decontamination processes

Selection of two different areas, one in Terceira island and the other in the Region of Lisbon and Tejo Valley (NUT II); the areas must have nitrate contamination and different hydrochemical and hydrological characteristics;

I.1) Preliminary geological and hydrogeological study of the area, based on the existing infrastructures;

I.2) Drilling of three secondary wells around the main well, for each area;

I.3) Pumping tests, namely for determining the transmissivity values;

I.4) Detailed hydrogeological study - based on the information gathered in the pumping wells - for determining the transmissivity of the formations, the porosity, the flow direction and other characteristics, such as the hydraulic gradient and the mean flow velocity;

I.5) *In situ* monitoring for determining the groundwater quality standards, namely the pH, Eh, temperature, conductivity and dissolved oxygen. The monitoring procedure will be made in different wells and for several depths in order to check if there is any water quality stratification; the process will be carried out over one year, every three months;

I.6) Water sampling for chemical and biological analysis, before starting the denitrification processes;

I.7) Analysis of a possible correlation between the bacterial population and the presence of nitrate in the water;

I.8) Analysis of the maximum depth where faecal bacteria can be found in the geological formations.

PHASE II - Analysis and optimisation of the denitrification processes

II.1) Water injection, in the three wells, containing two types of organic source capable of initialising the denitrification process; analysis of the different performances for both aquifers;

II.2) Treated water pumping in the central wells; determination of the convenient pumping rate;

II.3) Water sampling for chemical analysis during the experiments it is estimated that two samples will be collected each day, during the first 15 days; after that, and during the following 45 days, one sample per day will be collected; the total samples will be 150;

II.4) Injection of different quantities of carbon in the injection water;

II.5) Water sampling for chemical analysis (*the chemicals to be analysed will be nitrate, nitrite, ammonium, TOC; the main bacteria will also be analysed; the pH, Eh, dissolved oxygen, conductivity and temperature will be measured in the field*); during the experiments it is estimated that two samples will be collected each day, during the first 15 days; after that, and during the following 45 days, one sample per day will be collected; the total samples will be 150;

II.6) Analysis of the experimental results and optimisation of the carbon source quantities;

II.7) Analysis of the influence of pH and Eh for the determination of its importance in the cases analysed;

II.8) Influence of the bacterial population during the infiltration process;

II.9) Analysis of the type of soil influence, hydrogeology, flow conditions, bacterial population, and well distance, in order to establish the more convenient conditions.

PHASE III - Analysis of the aquifer behaviour for the denitrification process, at long term

Repetition of the most promising experiments carried out in the previous phase, namely for the same type of carbon source and for the same quantity;

III.1) Analysis of the aquifer behaviour at long term in agreement with nitrate removal and no clogging problems;

III.2) Water sampling in the two main wells; the samples will be collected daily, during a five month period, in a total of 300 samples;

III.3) Interpretation of the results obtained.

6.3.2 Programa de Investigação P12-AC2 - ASEM: BINGO 2000 - An EU-ASEM Concerted Action on measuring, monitoring and managing sustainability: the groundwater & coastal zones dimensions

6.3.2.1 Considerações Gerais

Com base no estipulado no Quinto Programa-Quadro, salientou-se no **Capítulo Oitavo** o seguinte:

A parte do programa relativa a Investigação para o Desenvolvimento tem por objectivo abordar, conjuntamente com os cientistas de países em desenvolvimento, os problemas de investigação directamente relacionados com os desafios do desenvolvimento, numa perspectiva de interesse mútuo e de longo prazo. Os assuntos a tratar serão escolhidos com base no diálogo e na cooperação com os grupos de países e regiões sobre as suas necessidades em matéria de IDT, prioridades e exigências socio-económicas específicas, tendo igualmente em conta os objectivos de política económica da Comunidade e os objectivos de desenvolvimento acordados a nível internacional, bem como a experiência adquirida com o Quarto Programa-Quadro.

*As **actividades da Comunidade e dos Estados-Membros** no domínio da cooperação internacional em matéria de investigação têm frequentemente por objecto questões idênticas ou conexas. Sem prejuízo da observância do princípio da subsidariedade, é não só possível mas também necessário **reforçar a coordenação em certos domínios**, o que permitiria elevar os esforços individuais acima da massa crítica e melhorar a eficácia, a flexibilidade e a visibilidade globais das actividades da Comunidade e dos Estados-Membros.*

6.3.2.2 Proposta de uma Acção Concertada de Investigação

Teve lugar em **Beijing**, R.P. China, de 24 a 27 de Novembro de 1998, uma Reunião de Coordenação de vinte e seis ***Contratos de Investigação*** e ***Acções Concertadas*** de **Cooperação Científica e Tecnológica com a Ásia**, seleccionados pela DGXII - Programa INCO-DC.

A Comissão Organizadora da Reunião de Coordenação foi formada por dois elementos da Comissão Europeia, o Prof. Tilak Viegas (*DGXII-INCO-DC Programme co-ordination*) e o Dr. Lorenzo Vallés (*EC Science Counsellor EU-Beijing, P.R. China Delegation*), **pelo autor *(representante científico europeu seleccionado pela DGXII)*** e por dois cientistas Chineses, o Dr. Hu Mu (*Department for International Co-operation of the State Science and Technology Commission of P.R. China*) e o Prof. Jinren Ni (*Prof. na Universidade de Beijing*).

Na secção de reflexão final para elaboração das conclusões e recomendações a incluir nos Proceedings do Workshop (*cf.* LOBO-FERREIRA e TILAK VIEGAS, 1999) o autor propôs a realização de uma **Acção Concertada de Investigação** sobre temas relacionados com **Zonas Costeiras e Águas Subterrâneas**, intitulada ***BINGO 2000*** (acrónimo de ***B***eijing, ***IN***ternational Co-operation, ***G***roundwater, ***O***ceans/Coastal Zones) a apresentar no ano ***2000*** ao Programa INCO-DEV da Comissão Europeia. Os objectivos desta Acção Concertada foram também apresentados em Pequim ao Presidente do Instituto de Cooperação Científica e Tecnológica Internacional (ICCTI) do Ministério da Ciência e Tecnologia de Portugal. Os

objectivos do Programa de Investigação BINGO 2000 são apresentados nas secções seguintes (em língua inglesa), tendo-se realçado a experiência indiana que se pensa ser muito rica e catalisadora de sinergias para extensão a outros países ASEM.

6.3.2.3 Necessidades de Investigação em Zonas Costeiras na Índia

Realizou-se em Goa, Índia, em 22 de Fevereiro de 1999, no âmbito do projecto comunitário "**Monitoring, Measuring, Managing Sustainability: the Coastal Dimension**" (que é coordenado financeiramente pelo LNEC, e cuja coordenação científica nacional é assegurada pelo autor) um Workshop de reflexão sobre os temas "**Coastal Hot Spots: Constituents and Drivers**" e "**Coastal Hot Spots**". O autor participou no Workshop tendo apresentado a comunicação LOBO-FERREIRA (1999).

As questões em análise no *Panel session I on Coastal Hot Spots: Constituents and Drivers* e no *Panel session II was Coastal Hot Spots* foram as seguintes:

What is being done to avoid/mitigate the problem? What can be done?

Pretende-se incluir na Acção Concertada **BINGO 2000** as recomendações e conclusões do Workshop de Goa. Assim, apresenta-se em seguida o resumo do Workshop, que as inclui:

The aim of the sessions was to arrive at:

1. *A sense of what constitutes a 'hot spot' in the coastal area?*
2. *What are the driving forces that transform coastal areas into 'Coastal Hot Spots'?*
3. *What can be done to avoid or mitigate these transformations?*

*In the course of the panel discussions it became clear that the term 'Hot Spot' could be very confusing. The participants felt that it might be better to use the phrase "**Coastal Vulnerability**" to development pressures.*

The discussions in the 1st and 2nd panel discussion can be summarised under the following themes:

1. ***'Coastal Vulnerability': constituents and drivers***
2. ***Mechanisms through which the driving forces impact the environment***
3. ***Possible ways of mitigating/avoiding the development of 'Coastal Vulnerability'***

1. Coastal Vulnerability: constituents and drivers

*In a general sense two main types of 'Coastal Vulnerable areas' can be identified: a) **Anthropogenic** or **Artificial** i.e. those created by societal pressures and b) **Natural**, i.e., those vulnerable due to their intrinsic characteristics, which are beyond human control, and most vulnerable to human intervention.*

From the discussion, 4 criteria emerged that can be used to either recognise a potential vulnerable area or an already degrading/degraded area.

*1. Existence of an **intrinsic vulnerability** arising from the fact of the area being low lying, tectonically unstable, prone to erosion/sedimentation.*

2. Existence of fragile ecosystems such as coral reefs, mangroves, sand dunes, wet lands and estuaries.

3. Existence of heavy pollutant loading from human activities.

4. Existence of activities that use up coastal resources faster than their regeneration capacity.

Some drivers identified by the panellists of relevance in the Indian context:

- *mining of sand and coral reefs;*
- *industrial activity;*
- *construction activity;*
- *fishing;*
- *tourism;*
- *intensive agriculture;*
- *intensive aquaculture;*
- *live stock rearing;*
- *chemical industries;*
- *power plants;*
- *endogenous population growth.*

2. Mechanisms through which the driving forces impact the environment

The panelists suggested the following to be of relevance to India:

- *type of technology used;*
- *socio-economic setting;*
- *resource institutions;*
- *deficient policy formulation;*
- *weak enforcement of rules and regulations;*
- *lack of monitoring;*
- *market economy;*
- *demographic changes.*

3. Possible ways of mitigating/avoiding the development of 'Coastal Vulnerability'

- *to reserve areas or zones, and work with a conservation plan with controlled anthroprogenic activity;*
- *to develop marine parks and sanctuaries;*
- *to generate alternative income generating options for those dependant on coastal resources;*
- *to create incentives in the form of reduced tariffs, subsidies, etc., to use alternatives to sensitive coastal resources such as sand, coral etc.;*
- *to have regulatory mechanisms in place for monitoring programs;*
- *to enforce rules and regulations;*
- *to educate and create an awareness among stakeholders;*
- *to undertake research and disseminate results;*
- *to identify coastal districts for future developments;*

- *to develop policy and ban use of scarce and resources.*

Some of the methods used to arrive at these responses:

- *participatory bottom up planning process;*
- *integration of socio-economic and environment data to facilitate planning;*
- *capacity building programs for institutions and government;*
- ***GIS tools** and remote sensing techniques **to arrive at vulnerable areas**, sustainable zone plans, etc.;*
- *identification of geographically fragile and biodiversity sensitive areas and prioritising the issues of concern accordingly.*

India has a vast coastline with varying problems. There is need of prioritising and identifying critical areas first. However, as the nature of the problems differ across the country, prioritising can be difficult. The Expert group and the subsequent session by the main researchers of the project arrived at the following main drivers of importance to coastal India: Tourism, Industrialisation, Urbanisation, Intensive aquaculture and Port Activity.

6.3.2.4 Temas de Investigação a considerar na Acção Concertada BINGO 2000

Tendo em atenção as conclusões e recomendações anteriores procurar-se-á que as instituições participantes desenvolvam a sua contribuição nesta acção concertada nos temas seguintes:

Integrated Water Resources Planning

Research and technological development under this priority topic concerns: a) the establishment of political economy of water resources development for agriculture and rural areas, for industry and tourism, and for urban development; b) the development of criteria and procedures for transboundary planning and management, including floods forecast and warning systems; c) integrated holistic water resources planning at regional scale, including soil and water conservation; d) mechanisms for monitoring and controlling surface and groundwater quality; and e) technologies for water treatment and reuse.

Water Quality Management

Problems of water quality may reduce the availability of water resources for human, industrial and agricultural uses. Water quality problems are in general caused by misuse of water. Policies and technologies which avoid degradation of water resources and help to restore their quality are therefore among the priority water issues.

Several aspects may be considered under this topic: a) expand water quality monitoring, including the development of reduced cost methods of assessment and standards for chemical, physical and biological loads; b) develop technologies and mechanisms favouring the control of point source pollution due to industry and domestic uses; c) develop best management practices, guidelines, incentives, and evaluation procedures to combat non-point source pollution from agriculture due to fertilisers and agro-chemicals; d) support updated technologies for control of erosion and sediments load from upland areas, including the maintenance of terraces and afforestation; e) develop simple methods for waste-water

treatment for agriculture and landscape reuse.

Preservation and Rehabilitation of Groundwater Quality

The goal of this action is to go further in the investigation of dynamic analysis of ***groundwater quality. The aim is to have better prediction and modelling of groundwater behaviour in real cases*** *of pollution and rehabilitation of polluted aquifers. Under this action techniques will be developed, using in situ experimental tests, for the preservation, protection and rehabilitation of polluted aquifers. It is expected that, with this action, better knowledge will be achieved of the physical, chemical and biological mechanisms ruling the soil/aquifer environment. Better knowledge of these mechanisms will provide the basis on which aquifer control and rehabilitation processes will be improved. At the present state of the art, the main problem lies in the deficient conceptual representation of the real medium and phenomena that occur.*

State of the Environment and Decision Support Indicators

The main objective of this R&D area is to contribute to support the decision making process on environmental matters through the definition of state of the environment and management indicators. Its focus is mainly on those quantitative and qualitative aspects which are relevant for water resources systems management - lakes and reservoirs, rivers, estuary and coastal systems, as well as ***groundwaters*** *- taking into consideration the interrelations, not only among these systems, but also with air and soil quality. The predicted results include the definition of sets of environmental indicators, within different degrees of aggregation, which may contribute to quantitative and qualitative characterisation and management of the water systems in ASEM countries, in co-ordination with similar R&D work being developed namely at the European Union and at the Organisation for Economical and Co-operation Development (OECD) levels.*

Planning and Management of Water Resources Systems

The scope of this research action is the study, development and application of modern methodologies to plan and manage water resources systems. By 'planning' is meant the establishment of new structures or the expansion of present water resources systems. By 'management' is meant the establishment of efficient regimes for the operation of these systems. ***Development methodologies are based on simulation and optimisation techniques.*** *These include mathematical programming and heuristic algorithms (e.g. simulated annealing, genetic algorithms, neural networks, taboo search, etc.) and also decision theory and graphic computing techniques. It is intended to ensure that techniques developed are of practical use to management and that results do not simply remain on the level of theory due to legal or social constraints or constraints of tradition.*

Optimised Management of Aquifers

The goal of this action is to develop the ***appropriate evaluation methodologies for groundwater resources****, aiming at optimal exploitation of these resources. These evaluation methodologies will be primarily applied to coastal zones and insular regions, national or in*

foreign countries and, in particular, those subjected to accelerated development. These methodologies aim at the mitigation of environmental risks due to development. The effect of scale is of major importance in insular regions, undermining the direct application of scientifically based methods already tested on continental mainland. In this action the application of methods for the ***evaluation of the intrinsic vulnerability of aquifers*** *will be included.*

Preservation and Rehabilitation of Groundwater Quality

The goal of this action is to go further in the investigation of ***dynamic analysis of groundwater quality****. The aim is to have better prediction and modelling of groundwater behaviour in real cases of pollution and rehabilitation of polluted aquifers. Under this action techniques will be developed, using in situ experimental tests, for the preservation, protection and rehabilitation of polluted aquifers. It is expected that, with this action, better knowledge will be achieved of the physical, chemical and biological mechanisms ruling the soil/aquifer environment. Better knowledge of these mechanisms will provide the basis on which aquifer control and rehabilitation processes will be improved. At the present state of the art, the main problem lies in the deficient conceptual representation of the real medium and phenomena that occur.*

Renewable Groundwater Resources: Evaluation and Calibration of Groundwater Recharge

The goals of this action are several: the ***evaluation of renewable groundwater resources*** *in selected areas under distinct hydrogeological and climatological conditions; the characterisation of diverse measurable parameters and the application of appropriate methods to the quantification of renewable resources; the development of mass balance models, adapting existing models or creating new ones, and calibration of such new models based on already quantified resources; the use of these new models to evaluate renewable groundwater resources, using fundamental data, in areas where such resources have not yet been evaluated; the development of synthetic maps of renewable groundwater resources for ASEM countries; the development of experimental fields that allow study and control of the infiltration process.*

Monitoring for the Sustainable Management of Coastal Zones

It is recognised that, in general terms, there is little legislation to guide and support coastal zone management, but that there is a strong positive relation between a well organised integrated legal and institutional framework and efficient policy development and implementation.

On the other hand, any political or administrative decision must be taken on the basis of a good scientific knowledge and when possible on the basis also of the forecast of the effects of alternative courses of action.

The institutional framework harmonised and supported by the scientific knowledge are needed to define the role of the different actors, as well as to provide the basis to set up environmental objectives (e.g. on water quality, physical planning, exploitation of natural resources). These institutional and scientific frameworks are also crucial to ensure the

execution of Environmental Impact Assessments (EIA) studies prior to major development interventions .

The management policies shall be guided by four basic principles that can be defined as follows:

1. *to preserve, protect, develop and where possible, to restore or enhance the resources of the coastal zone;*
2. *to promote the development and implementation of management programmes;*
3. *to encourage the preparation of "special area management plans" to protect natural resources of particular significance;*
4. *to encourage the participation and co-operation of the public.*

In this context, the main lines of research shall cover:

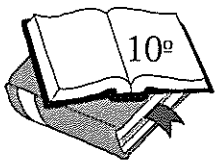
- *Methodologies to characterise the coastal processes, both on their physic, chemical and biological characteristics and on the socio-economic aspects which drive the pressures on the zone.*
- *Tools to assess the alternative courses of action, which may allow the scientific community to support the decision makers on the forecast of their policy decisions.*

Methodologies for monitoring and evaluate the state of the coastal zone, as it evolves on the sequence of management (or lack of) measures.

6.3.2.5 Participantes da Acção Concertada BINGO 2000

São potenciais instituições participantes na Acção Concertada BINGO 2000 as instituições dos participantes nos **Workshops de Beijing (China) e de Goa (Índia)**, anteriormente referidos, bem como outras instituições que tenham desenvolvido investigação em países ASEM, nos temas em análise nesta Acção Concertada.

CAPÍTULO DÉCIMO



CONCLUSÃO

1. SÍNTESE GERAL

Para o Programa de Investigação que se apresenta, relativo ao *Concurso de acesso a Investigador Coordenador do Laboratório Nacional de Engenharia Civil*, foi seleccionado o tema **Inventariando, Monitorizando e Gerindo de Forma Sustentável Recursos Hídricos Subterrâneos - A Situação Portuguesa, os Desafios da União Europeia e a Globalização.**

Com o Programa de Investigação visou-se: (1) contribuir para uma melhor sustentação científica no domínio dos **Recursos Hídricos Subterrâneos**, incorporando *criticamente* o vasto conhecimento já adquirido no País; (2) contribuir para um melhor conhecimento sobre

os temas de investigação na União Europeia, visando o reforço das actividades nacionais de investigação, em recursos hídricos subterrâneos, no contexto actual de vontade política de incrementar a acção portuguesa de investigação na Europa; e (3) contribuir para um melhor conhecimento nacional sobre o tema da internacionalização além União Europeia, visando o reforço das actividades nacionais de investigação em recursos hídricos subterrâneos aplicados ao contexto actual, e pretendido, de globalização e afirmação do papel internacional da investigação comunitária.

No Capítulo Nono *um plano de estudos relativo a alguns desses problemas,* cita *a metodologia proposta, o planeamento dos meios necessários, os objectivos a atingir e os benefícios operados da sua realização.* Relembra-se a constituição do **Plano de Estudos** desenvolvido no Capítulo Nono:

PARTE 1: Projectos de Investigação a desenvolver em **Portugal**;

PARTE 2: Projectos de Investigação a desenvolver em parceria na **Europa;**

PARTE 3: Projectos de Investigação a desenvolver em parceria no resto do **Mundo.**

PARTE 1 - INVESTIGAÇÃO EM PORTUGAL: PLANO DE ESTUDOS PROPOSTO

Investigação sobre Recarga de Águas Subterrâneas:

1. **Programa de Investigação P1**- *Estudos de calibração de métodos de avaliação da recarga regional de aquíferos e de outras regiões de interesse hidrogeológico*
2. **Programa de Investigação P2** - *Ensaios de laboratório e modelação matemática da infiltração e do escoamento, na zona vadosa e na zona saturada*

Investigação sobre Vulnerabilidade à Poluição de Águas Subterrâneas:

3. **Programa de Investigação P3-SADCC** - *Validação e verificação do desempenho de modelos de avaliação da vulnerabilidade à poluição de águas subterrâneas* (a desenvolver em Portugal e em países do sul de África)

Investigação sobre Monitorização de Águas Subterrâneas:

4. **Programa de Investigação P4** - *Monitorização de águas subterrâneas em antigas lixeiras e em novos aterros sanitários*

Investigação sobre Protecção de Águas Subterrâneas:

5. **Programa de Investigação P5** - *Zonamento e mapeamento automático de perímetros de protecção de captações de águas subterrâneas*

Investigação sobre Qualidade e Reabilitação de Águas Subterrâneas:

6. **Programa de Investigação P6** - *Desnitrificação in situ de aquíferos poluídos por nitratos*
7. **Programa de Investigação P7** - *Interacção qualitativa águas superficiais - águas subterrâneas*

Investigação sobre Optimização e Gestão de Águas Subterrâneas:

8. **Programa de Investigação P8** - *Simulação, optimização e gestão de sistemas aquíferos sujeitos a intrusão salina*

PARTE 2 - INVESTIGAÇÃO NA EUROPA: PLANO DE ESTUDOS PROPOSTO

Países da União Europeia:

9. **Acção Concertada de Investigação P9-AC1** - COST: *The Future of Water in Europe*

Rússia:

10. **Programa de Investigação P10-INTAS** - *Methods of groundwater vulnerability assessment and mapping in case of massive and local chemical and radioactive contamination*

PARTE 3 - INVESTIGAÇÃO NO RESTO DO MUNDO: PLANO DE ESTUDOS PROPOSTO

Países de África: Mediterrânicos, PALOP e África do SUL:

11. **Programa de Investigação P11** - *Desenvolvimento de metodologias para avaliação de recursos e riscos hidrogeológicos de ilhas atlânticas*
12. **Programa de Investigação P8-MEDEA** - *MEDiterranean Environment Aquifers Sustainable management of coastal freshwater resources under socio-economic (urbanisation, tourism) development and climate scenarios*
13. **Programa de Investigação P3-SADCC** - *Validação e verificação do desempenho de modelos de avaliação da vulnerabilidade à poluição de águas subterrâneas: Aplicação a países da UE e da SADCC*

Países da América Latina: Brasil e Chile:

14. **Programa de Investigação P1+P10-Brasil** - *Estudos de calibração de métodos de avaliação da recarga regional de aquíferos e optimização da exploração de águas subterrâneas: Aplicação ao Nordeste Brasileiro*
15. **Programa de Investigação P7-MERCOSUR** - *Interacção águas superficiais-águas subterrâneas. Estudo de alternativas de tratamento de solos e de águas subterrâneas contaminados por metais pesados. Ensaios de laboratório e implementação numa área contaminada*

Países da Ásia: ASEM:

16. **Programa de Investigação P6-China** - *In situ rehabilitation of polluted aquifers. Optimisation of methodologies*

Acção Concertada de Investigação P12-AC2-ASEM: *BINGO 2000* - *An EU-ASEM Concerted Action on measuring, monitoring and managing sustainability: the groundwater & coastal zones dimensions*

Sobre a temática Indicadores para Planeamento e Gestão Ambiental, NEVES e NUNES CORREIA (1994), referem LOBO-FERREIRA (1993), citando o seguinte:

Com base neste conceito de vulnerabilidade (*cf.* Capítulo Segundo), *são propostos os seguintes indicadores quantitativos de águas subterrâneas:*

- ***Nível piezométrico de aquíferos** livres e cativos;*
- *Valor anual médio da **recarga regional de aquíferos**;*
- *Taxa de **exploração de águas subterrâneas** (balanço extracções-recarga);*
- *Dimensão da cunha de intrusão salina em aquíferos costeiros.*

Os projectos propostos no Plano de Estudos apresentado no Capítulo Nono, visam contribuir para a melhoria do Estado do Ambiente em Portugal no espírito apresentado por NUNES CORREIA *et al.* (1994).

De igual modo, com a elaboração de novas propostas, e/ou com a extensão e adaptação das

propostas portuguesas, a outros países da Europa, de África, da América Latina e da Ásia, procuraram-se criar novas sinergias. Para tal, o autor desenvolveu (e continua a desenvolver), um amplo conjunto de contactos que visam a elaboração de novas propostas para desenvolvimento além fronteiras.

Na análise feita procurou-se, implícita ou explicitamente, verificar onde possa haver eventuais especificidades portuguesas, que mereçam uma reflexão própria ou que não tenham sido consideradas na legislação comunitária, nomeadamente no *Plano de Acção Integrada dos Recursos Hídricos Subterrâneos*, e na nova *Lei-Quadro da Água*. Da análise feita, realça-se a especificidade correspondente ao regime de precipitações sobre o território de Portugal Continental, extremamente irregular no espaço e no tempo quando comparado com o dos países comunitários do centro e do norte da Europa. Tal facto acarreta significativas diferenças nos regimes quer anuais quer sazonais do escoamento superficial e da recarga de aquíferos. O consequente *stress* sobre o meio hídrico, quer quantitativo quer qualitativo, é óbvio no caso Português. Observações periódicas dos níveis freático e piezométrico, e da qualidade da água, *i.e* a monitorização quantitativa e qualitativa dos sistemas aquíferos e de outras unidades hidrogeológicas de interesse, é assim fundamental em Portugal devendo merecer das autoridades competentes, quer a nível nacional quer regional, uma dedicação muito especial. Esse é, hoje, o espírito do Governo, do INAG e das DRAs. De facto, realizou-se em 9 de Abril de 1999 a Sessão Pública de Apresentação do Plano Nacional da Água e dos Planos de Bacia Hidrográfica, realizada pelo INAG no Centro Cultural de Belém. Foram oradores nessa Sessão, entre outros, Sua Excelência a Ministra do Ambiente, Sua Excelência o Secretário de Estado Adjunto da Ministra do Ambiente, o Presidente do INAG, os Consultores do Plano Nacional da Água Prof. Manuel Oliveira da Silva e Prof. Francisco Nunes Correia, e o autor. O desenvolvimento, a importância e a actualidade do tema ***Protecção e Gestão de Águas Subterrâneas*** mereceu, de facto, amplo consenso.

2. BENEFÍCIOS

Transcrevem-se em seguida extractos do Capítulo Nono, onde se apresentaram directa ou indirectamente os benefícios esperados da implementação do Plano de estudos proposto:

- ***Programa de Investigação P1*** - *Estudos de calibração de métodos de avaliação da recarga regional de aquíferos e de outras regiões de interesse hidrogeológico*

- ***Programa de Investigação P1+P10-Brasil*** - *Estudos de calibração de métodos de avaliação da recarga regional de aquíferos e optimização da exploração de águas subterrâneas: Aplicação ao Nordeste Brasileiro*

Tendo-se desenvolvido e calibrado diversos métodos para a estimativa da recarga, pretende-se, como grande objectivo deste Projecto, quer seja a partir da extrapolação espacial dos resultados dados pelos modelos de balanço hídrico, quer seja pela extrapolação espacial dos resultados obtidos pelo método da decomposição dos hidrogramas, quer seja pelo conhecimento adquirido pela aplicação de outros métodos, obter um mapa dos recursos hídricos subterrâneos renováveis disponíveis interanualmente.
E o ... *desenvolvimento de metodologias expeditas que permitam fazer a caracterização espacial da recarga, permitindo o seu cálculo a partir da existência de informação de base. O resultado final será a elaboração de um mapa de recursos hídricos subterrâneos renováveis disponíveis interanualmente. Este mapa deverá também incluir os valores de recarga obtidos mediante estudos desenvolvidos localmente e utilizando outros métodos.*

- ***Programa de Investigação P2*** - *Ensaios de laboratório e modelação matemática da infiltração e do escoamento, na zona vadosa e na zona saturada*

Em cada um dos campos experimentais realizar-se-ão diferentes tipos de ensaios. Os mais importantes serão a simulação de chuvadas de diferentes intensidades e com diferentes períodos de ausência de chuva, com observação em profundidade e no tempo da evolução do teor de humidade e da tensão capilar no material. Estas observações permitirão obter dados de entrada para modelos de escoamento e de infiltração da zona não-saturada, que se pretendem fazer em seguida.

- ***Programa de Investigação P3-SADCC*** - *Validação e verificação do desempenho de modelos de avaliação da vulnerabilidade à poluição de águas subterrâneas: Aplicação a países da UE e da SADCC*

No Capítulo Segundo concluiu-se ser importante o desenvolvimento de estudos de calibração dos métodos de avaliação da vulnerabilidade à poluição de aquíferos, nomeadamente do método DRASTIC, para permitir a comparação dos seus resultados quantitativos (i.e. em termos de valor do índice) e qualificativos (i.e. qualificando as classes de vulnerabilidade em termos de "muito elevada", "elevada", "média", "baixa" e/ou "muito baixa") com os resultados da campanha de análises da qualidade de água dos sistemas aquíferos de Portugal, e.g. do Baixo Tejo e Sado monitorizados pelo LNEC para o Instituto da Água no âmbito dos estudos desenvolvidos para o Plano de Bacia do rio Tejo, durante Outubro e Novembro de 1998 (cf. LOBO-FERREIRA et al. 1999). ..e *....concluiu-se ainda, ser importante a comparação desses resultados quantitativos e qualificativos com os obtidos por outras técnicas...*

Na sequência de anteriores projectos sobre o tema Vulnerabilidade de Aquíferos, co-financiados por fundos comunitários (DGXI e Fundo de Coesão, *cf.* Capítulo Segundo) procurou-se aumentar as possibilidades de financiamento da proposta pelo novos fundos comunitários e/ou por verbas do Quinto Programa-Quadro (DGXII - Programa INCO-DEV), com a constituição de uma parceria consitituída por países comunitários e africanos.

- ***Programa de Investigação P4*** *- Monitorização de águas subterrâneas em antigas lixeiras e em novos aterros sanitários, e*
- ***Programa de Investigação P5*** *- Zonamento e mapeamento automático de perímetros de protecção de captações de águas subterrâneas*

O principal benefício de um projecto desta natureza é quantificar o grau e a extensão de um problema de poluição cujos efeitos apenas se conhecem em casos isolados. Com este conhecimento será possível dar consistência ao cumprimento da legislação e dos critérios impostos pela UE, onde ***prevenir, proteger, reabilitar*** *são os três aspectos fundamentais da gestão e protecção dos recursos hídricos subterrâneos.*

Realizou-se em 14 de Abril de 1999 a Sessão Pública de Apresentação do **Plano Nacional de Protecção e Gestão de Águas Subterrâneas**, realizada pelo INAG no Centro Cultural de Belém. A necessidade urgente de implementação desse Plano Nacional, as carências de meios humanos e financeiros e as necessidade de investigação dos temas ***monitorização*** e ***protecção de captações de águas*** foram nessa sessão realçados pelos Directores Regionais do Ambiente, pela Chefia da Divisão de Recursos Subterrâneos do INAG, e pelos elementos do LNEC (o autor, a Dra. Teresa Leitão e o Dr. Manuel M. Oliveira) em nome do Consórcio do Plano de Bacia do Tejo, que conta com a colaboração do LNEC.DH.GIAS.

Sem dúvida que um dos domínios mais mal conhecido é o das áreas adjacentes e subjacentes de antigas lixeiras. Este projecto visa dar um passo substancial para um melhor conhecimento dessas zonas de elevado risco.

- ***Programa de Investigação P6*** *- Desnitrificação in situ de aquíferos poluídos por nitratos*
- ***Programa de Investigação P6-China*** *- In situ rehabilitation of polluted aquifers. Optimisation of methodologies*

O actual estado de conhecimentos sobre as tecnologias apropriadas para a remoção in situ de nitratos em águas subterrâneas permite apontar a ***desnitrificação biológica como o processo que apresenta melhor desempenho.*** *Não obstante, muitas incertezas subsistem na aplicação das tecnologias para a descontaminação in situ relacionadas com os seguintes aspectos:*

- *tipo de meio envolvente - o tipo de formações geológicas (porosas, fracturadas e cársicas) onde é possível ter sucesso na descontaminação, as condições físicas, químicas e biológicas ideais para o processamento da desnitrificação, e*
- *os processos de desnitrificação em si mesmos - nomeadamente na optimização da fonte de energia a adicionar à água para o melhor desenvolvimento dos processos, pH mais favorável.*

Com este projecto pretende-se contribuir para incrementar os conhecimentos no domínio da desnitrificação in situ através da quantificação dos parâmetros mais relevantes para o bom desempenho destas tecnologias, parâmetros esses relacionados quer com o meio envolvente quer com as variáveis do próprio processo de desnitrificação.

A experiência prática a obter será posteriormente analisada à luz de outros casos de estudo

semelhantes por forma a extrapolar condições gerais de aplicação de tecnologias de desnitrificação. Com o estudo pretende-se optimizar valores de concentração de orgânicos na água de injecção, valores de pH do meio e concentração de oxigénio dissolvido, para os casos estudados. Pretende-se ainda analisar a adequabilidade de algumas condições físicas do meio como o regime de escoamento e hidrogeologia das formações onde se desenvolvem as experiências, porosidade e permeabilidade hidráulica mínimas para o bom desempenho das tecnologias.

Pretende-se que a optimização dos processos acima descritos permita igualmente determinar as condições ideais para evitar a colmatação da matriz porosa através da acumulação de matéria orgânica e de gases à volta dos furos, aspecto que constitui presentemente um dos maiores entraves ao bom desempenho da desnitrificação in situ.

- ***Programa de Investigação P7*** *- Interacção qualitativa águas superficiais - águas subterrâneas: Aplicação ao caso de estudo dos campos da Golegã, no Paúl do Boquilobo*
- ***Programa de Investigação P7-MERCOSUR*** *- Interacção águas superficiais-águas subterrâneas. Estudo de alternativas de tratamento de solos e de águas subterrâneas contaminados por metais pesados. Ensaios de laboratório e implementação numa área contaminada*

Constituem principais objectivos do projecto os seguintes aspectos: (1) ***análise da problemática relacionada com a interacção águas superficiais - águas subterrâneas****; (2) análise da vulnerabilidade e do risco à poluição das águas subterrâneas da região; (3) caracterização da qualidade das águas subterrâneas e a análise da sua tendência evolutiva; e (4) estabelecimento de medidas a adoptar para a protecção dos recursos hídricos subterrâneos.*

Estando as águas subterrâneas e as águas superficiais intimamente ligadas pelo ciclo hidrológico, o bom estado de conservação das águas subterrâneas depende fortemente do bom estado de conservação das águas superficiais. QUINTELA (1981) refere precisamente isso "*A extracção de água de um aquífero com interacção com rios ou com lagos pode provocar o aumento da alimentação a partir daquelas origens...*". Se as origens estiverem poluídas obviamente que se provocará uma degradação na qualidade das águas subterrâneas. O contrário também é válido, por exemplo a despoluição de uma linha de água só será bem sucedida se tiverem sido limpas as águas subterrâneas e o consequente escoamento fluvial de base a ele afluente, vindo de aquíferos ou áreas geológicas adjacentes e subjacentes.

É, assim, óbvio o interesse em se aprofundar a **análise da problemática relacionada com a interacção águas superficiais - águas subterrâneas.**

- ***Programa de Investigação P8*** *- Simulação, optimização e gestão de sistemas aquíferos sujeitos a intrusão salina, e*
- ***Programa de Investigação P8-MEDEA*** *- MEDiterranean Environment Aquifers Sustainable management of coastal freshwater resources under socio-economic (urbanisation, tourism) development and climate scenarios*

Como se referiu anteriormente, no Anexo VII de NUNES CORREIA *et al.* (1994) (*cf.* "**Indicadores para Planeamento e Gestão Ambiental**", de NEVES e NUNES CORREIA, 1994) refere-se que: ... *com base neste conceito de vulnerabilidade (cf.* Capítulo Segundo*), são propostos os seguintes indicadores quantitativos de águas subterrâneas:*

- ...
- *Dimensão da cunha de* ***intrusão salina em aquíferos costeiros.***

Estas propostas visam dar um novo impulso aos estudos de investigação programada a desenvolver pelo LNEC.DH.GIAS em parceria com as outras instituições proponentes na área da Gestão e Optimização da Exploração de Águas Subterrâneas.

Finalmente, os dois seguintes projectos de investigação programada e as duas acções concertadas de investigação:

- ***a Acção Concertada de Investigação P9-AC1-COST*** - *The Future of Water in Europe;*
- ***o Programa de Investigação P10-INTAS*** - *Methods of groundwater vulnerability assessment and mapping in case of massive and local chemical and radioactive contamination;*
- ***o Programa de Investigação P11*** - *Desenvolvimento de metodologias para avaliação de recursos e riscos hidrogeológicos de ilhas atlânticas;, e*
- ***a Acção Concertada de Investigação P12-AC2 - ASEM: BINGO 2000*** - *An EU-ASEM Concerted Action on measuring, monitoring and managing sustainability: the groundwater & coastal zones dimensions.*

foram elaborados para:

- reforçar as actividades nacionais de investigação em recursos hídricos, no contexto da vontade política actual de **incrementar a acção portuguesa de investigação na Europa**;
- contribuir para um melhor conhecimento nacional sobre o tema da internacionalização, além União Europeia, visando o **reforço das actividades nacionais de investigação em recursos hídricos, aplicados ao contexto actual de globalização e afirmação do papel internacional da investigação** comunitária.

Realça-se que a proposta ***BINGO 2000*** englobará numa só Acção Concertada de Investigação, a ser coordenada pelo LNEC, praticamente todos os temas analisados neste Programa de Investigação. Trata-se de uma acção global que se pretende venha a pôr em contacto directo uma selecção de instituições dos participantes dos **Workshops de Beijing (China) e de Goa (Índia)**, referidos no Capítulo Nono, bem como de outras instituições que têm desenvolvido investigação em países ASEM, nos temas a analisar nesta Acção Concertada.

3. EXEQUIBILIDADE

3.1 Meios Humanos

Em 1999, além do autor, a equipa do GIAS é constituída pela Investigadora Auxiliar Teresa Eira Leitão (Doutora em Geologia, ramo Hidrogeologia, pela Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa), pelo Assistente de Investigação Manuel M. Oliveira (licenciado e mestre em Geologia Económica e Aplicada pela Faculdade de Ciências de Lisboa), pela Assistente de Investigação Maria Emília Novo (licenciada em Geologia e em Geologia Económica e Aplicada e mestre em Geologia Económica e Aplicada pela Faculdade de Ciências de Lisboa), pela Estagiária de Investigação Maria João Moinante (licenciada em Geologia Económica e Aplicada, estudante do Mestrado em geo-recursos, área de hidrogeologia, do Instituto Superior Técnico) e pela Técnica de 1ª Classe Maria José Henriques (da carreira de Técnico Experimentador, estudante universitária da Licenciatura em Geologia da Faculdade de Ciências de Lisboa).

Complementando a equipa, o GIAS conta em 1999 com a estagiária da Faculdade de Ciências de Lisboa/PRAXIS XXI Dra. Catarina Diamantino (no GIAS desde 1995), e com as colaborações da Dra. Paula Moreira (Bolseira PRAXIS XXI) e da Ir. Christy van Beek (holandesa, Bolseira do TechWare).

Continuando a tirar partido da Associação TechWare, de que o LNEC é membro fundador e de bolsas PRAXIS XXI, ou equivalentes, pretende-se renovar anualmente a equipa de colaboradores do GIAS, nacionais e estrangeiros, estagiando de seis meses a um ano no sector. Tal dará continuidade à proveitosa experiência adquirida no sector nos últimos dez anos (*cf.* Agradecimentos). O perfil pretendido para os estagiários, nacionais e estrangeiros, é o de Mestre, doutorando, Doutor e , eventualmente, licenciado.

Tendo todos os elementos do GIAS sido envolvidos directamente na reflexão sobre o Plano de Estudos que se apresenta no Capítulo Nono (*cf.* Agradecimentos), não se afigura difícil, no que se refere a Meios Humanos, a realização dos doze projectos propostos, a escalonar ao longo do período 2000 a 2007, em função do financiamento que vier a ser ganho.

3.2 Meios Financeiros

As verbas apresentadas para os projectos baseiam-se na experiência adquirida no sector ao longo dos seus oito anos de existência. O Índice de Gestão do sector que serviu para o planeamento dos doze projectos, foi o AE/DT (*i.e.* Actividade Externa/Despesa Total). O valor médio dos últimos oito anos do LNEC.DH.GIAS foi de 1,06, equivalente ao valor de referência pretendido para os sectores operativos do DH de 1,00. O Plano de Estudos proposto visa prosseguir, no horizonte 2000-2007, a experiência positiva registada no sector nos últimos anos (1991-1999).

As verbas solicitadas para financiamento das propostas apresentadas no Capítulo Nono, considerando uma taxa de sucesso das propostas comunitárias de 50%, seriam as seguintes:

1. Financiamento Comunitário (*e.g.* DGXII: INCO-DEV/INCO-MED): ≅ 3 x 100 000 Euros;
2. Financiamento por verbas de Investigação Nacional (*e.g.* MCT: ICCTI e PRAXIS XXI): ≅150 000 Euros (30 000 contos);
3. Financiamento por Instituições Nacionais da Administração Central e Regional (*e.g.* INAG, ICN, DRA Lisboa e Vale do Tejo, etc.) ≅ 300 000 Euros (60 000 contos);
4. Financiamentos do Instituto de Resíduos, da Empresa Geral de Fomento e/ou do Plano Estratégico de Resíduos Industrias (PERI) do Ministério do Ambiente: ≅ 75 000 contos;
5. Valor do financiamento externo estimado para os projectos *ganhadores* do Plano de Estudos (incluindo as aplicações complementares a desenvolver na Europa, África, América Latina e Ásia): ≅ 1 125 000 Euros (≅ 225 000 contos);
6. Financiamento por Verbas Próprias do LNEC: 60 000 contos, o que corresponde a 21% da verba total estimada para o Plano de Estudos, *i.e.* ≅ 285 000 contos (≅ 1 450 000 Euros).

Será fundamental, para alcançar os objectivos deste Programa de Investigação:

1. **poder contar com as Verbas de Investigação Próprias do LNEC**, ao mesmo nível do verificado, em média, nos últimos anos **no valor de 20%** da actividade total do sector (mais precisamente 23,7%, de acordo com o Anexo 5 da Resenha de Actividade do autor apresentada ao concurso, *cf.* LOBO-FERREIRA, 1999a);

2. **poder contar com a habitual comparticipação do LNEC** (de 50% do valor total do projecto) **nos projectos comunitários** do Quinto Programa-Quadro, que abrangem o período 1999-2002, e nos programas quadro-seguintes;

3. **poder contar** nos projectos nacionais suportados por verbas do **Ministério da Ciência e Tecnologia, com verbas para pagamento de pessoal da instituição**. Realça-se que em

1999, todos os elementos do GIAS, referidos no ponto 3.1, passarão de contratados a termo certo a pessoal do *quadro* da Carreira de Investigação do LNEC.

Estou seguro que o sector continuará a contar com todo o apoio da Direcção do LNEC e da Chefia do Departamento de Hidráulica para alcançar os objectivos que lhe estão atribuídos, e consequentemente, para dar exequibilidade ao Plano de Estudos proposto no Capítulo Nono. O seu atempado desenvolvimento permitirá continuar a assegurar a presença activa do LNEC.DH em Portugal, na Europa e no Resto do Mundo, como se ilustrou para o LNEC.DH.GIAS no Anexo 4 da Resenha de Actividade do autor (apresentada ao concurso) e na página do sector na Internet, disponível em http://www-dh.lnec.pt/gias/gias.html.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Águas subterrâneas: será que são *"efémeras"*?

- ***Mas o que é que quer dizer "efémero"? repetiu o principezinho que, em toda a sua vida, nunca renunciava a uma pergunta que tivesse feito***
- ***Ah! disse ao principezinho, ... E já não tenho nada para beber e também eu seria feliz se pudesse dirigir-me lentamente a uma fonte!*** *(de O Principezinho de Antoine de Saint-Exupéry)*

Ainda no deserto... ou em Portugal? E se a encontrar em Portugal... será que dela ainda brota água? Será que dela poderá beber? Será que o seu caudal é ***"efémero"?***

Neste Programa de Investigação apresentaram-se metodologias e um Plano de Estudos para as conhecer melhor, para melhor controlar a sua quantidade e melhor conhecer a sua qualidade, no fundo para a gerir melhor. Porque foi maltratada neste último século do nosso II Milénio e é fundamental para o desenvolvimento sustentável do Mundo em que vivemos.

LNEC, 25 de Abril de 1999

ANEXO1

SELECÇÃO DE RESULTADOS DA PESQUISA FEITA ÀS BASES DE DADOS *WATER RESOURCES ABSTRACTS* E *ENVIRONMENT LIBRARY* (EDITORA *SILVERPLATTER INTERNATIONAL*) SOBRE

APLICAÇÕES DO MÉTODO DRASTIC

1. TI: Using "DRASTIC" to improve the integrity of geographical information system data used for solid waste management facility siting: A case study.
AU: Padgett,-D.A.
AF: Dep. Geogr., Univ. Florida, 3141 Turlington Hall, Gainesville, FL 32611-2036, USA
SO: ENVIRON.-PROF. 1994 vol. 16, no. 3, pp. 211-219
IS: ISSN 0191-5398
PY: 1994
PT: J (Journal-Article)

AB: Beginning in 1989, the commissioners of Alachua County, Florida, began to develop a siting plan for a new solid waste management facility (SWMF). Several evaluative criteria were selected and then translated into parameters for a geographical information system (GIS). With 100 percent of the county's population drinking groundwater, parameters addressing aquifer protection were weighted heaviest. Despite efforts to avoid vulnerable terrain, the selected SWMF site was located in close proximity to the county's major well field. The siting results were met by a wave of protests from local residents who feared that leachate from the proposed SWMF could contaminate the Floridan aquifer, the community's primary drinking water supply. Citizens complained that the threat of contamination of local surficial aquifer wells would be overlooked, since no parameters addressing the threat were included in the GIS data base. In this study, DRASTIC, a groundwater pollution potential evaluation method, was applied in order to improve the accuracy and defensibility of the groundwater protection-based GIS parameters. The results derived using DRASTIC appear to evaluate more accurately the susceptibility of the north-central Florida karst region and thus are more defensible in the face of citizen conflict and opposition.

DE: solid-wastes; waste-disposal-sites; geographic-information-systems; groundwater-; aquifers-; USA,-Florida,-Alachua-Cty.; environmental-impact; landfills-; waste-disposal; waste-management; case-studies; water-pollution-sources; drinking-water
CL: Ultimate-disposal-of-wastes (3050)
AN: 3624406

2. TI: Application of the DRASTIC Mapping System for Evaluating Ground Water Pollution Potential in Ohio.
AN: W91-11178
AU: Petty,-R.-J.; Hallfrisch,-M.-A.
CS: Ohio Dept. of Natural Resources, Columbus. Div. of Water.
SO: IN: Agrichemicals and Groundwater Protection: Resources and Strategies for State and Local Management. Freshwater Foundation, Navarre, Minnesota.1989. p 181-200, 6 fig, 2 tab, 4 ref, 3 map.
PY: 1989
DE: *DRASTIC-system, *Geographic-information-systems, *Groundwater-pollution, *Mapping-, *Maps-, *Nonpoint-pollution-sources, *Ohio-, *Pollution-index
DE: Computer-programs, Geohydrologic-units, Groundwater-movement, Land-use, Optimization-, Water-use
CC: 05B, 07C

AB: A pollution potential mapping program for Ohio has been developed under the direction of the Division of Water, Ohio Department of Natural Resources, using the DRASTIC mapping process. The DRASTIC system consists of two major elements: the designation of mappable units, termed hydrogeologic settings, and the superposition of a relative rating system for pollution potential. Hydrogeologic settings form the basis of the system and incorporate the major hydrogeologic factors which affect and control ground water movement. The factors are incorporated into a relative ranking and rating scheme to produce a DRASTIC index value that represents the relative pollution potential. Hydrogeologic settings are combined with the index to create units that can be graphically displayed on maps. Demonstration mapping in Madison County, Ohio, resulted in a map with symbols and colors that illustrate areas of ground water contamination vulnerability. The mapping program is being implemented on a county wide basis across the state according to specific selection criteria including availability of geologic and hydrogeologic data, groundwater usage, and land use within a county. The DRASTIC system optimizes the use of existing data to rank areas with respect to pollution potential. In Ohio, the system will be used to help direct investigations and resource expenditures and to prioritize protection, monitoring, and land use planning efforts. (See also W91-11162) (Author's abstract).

3. TI: Characterization of Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings for the Fractured Rocks Near the Potomac River, Montgomery County, Maryland.
AN: W91-09636
AU: Atobrah,-K.; Jackson,-D.-A.; Keiller,-J.

CS: Geomatrix, Inc., Riverdale, MD.
SO: IN: Ground Water Issues and Solutions in the Potomac River Basin/Chesapeake Bay Region. National Water Well Association, Dublin, Ohio. 1989. p 125-144. 5 fig, 4 tab. 14 ref.
PY: 1989
DE: *Aquifer-characteristics, *Geohydrology-, *Groundwater-, *Groundwater-pollution, *Potomac-River, *Risk-assessment
DE: DRASTIC-model, Geologic-fractures, Land-use, Maryland-, Sensitivity-analysis, Water-pollution-sources
CC: 05B, 02F

AB: The potential for contamination has been characterized in a three year study of the fractured rock aquifers near the Potomac River in the western part of Montgomery County, Maryland. A hierarchy of hydrogeologic sensitivity factors has been employed to demonstrate the relative vulnerability of different sites within the area to groundwater pollution. Factors included depth to bedrock, depth to groundwater, structure of the rock formation, topography, recharge, proximity to major surface water bodies, man-made features, and hydraulic parameters for the porous fractured media. Field data for in-situ percolation tests, aquifer pumping tests, stream flow measurements, and climatic information for the general area were analyzed to determine the groundwater flow pattern within the fractured rocks. The analytical output was compared to evaluation exercises conducted by using other standardized systems for the determination of groundwater pollution potential such as the DRASTIC Index methodology. Results indicate that the fractured aquifer may be vulnerable to pollution in the Potomac River, although the potential for such occurrence at the study area was low. However, the aquifer should be carefully monitored during any future land use activities developed in the general area. (See also W91-09628) (Author's abstract)

4. TI: DRASTIC Approach to Controlling Groundwater Pollution.
AN: W90-01009
AU: Ng,-L.
SO: Yale Law Journal, Vol. 98, No. 4, p 773-791, 1989. 118 ref.
PY: 1989
DE: *Regulations-, *Water-pollution-control, *Groundwater-pollution
DE: Legal-aspects, Legislation-, Statistical-methods
CC: 05G, 02F

AB: Groundwater contamination is an environmental issue of greatest importance, but current federal and state efforts to protect groundwater describe a patchwork of activities and programs that is not adequate to the task. The most crucial factors in determining groundwater pollution potential-those described by the acronym, DRASTIC-consist of depth to water, recharge, aquifer media, soil media, topography, impact of the vadose zone, and conductivity of the aquifer. The DRASTIC relative ranking scheme uses a combination of weights and ratings to produce a numerical value, called the DRASTIC Index, which allows for the ranking of areas according to groundwater contamination vulnerability. The system optimizes the use of existing data, thus minimizing the need for costly and time-consuming geologic and hydrologic surveys, and provides an evaluation which can be used to direct resources, waste disposal, and land use activities. The proposed modified effluent charge approach would establish a coordinated framework for national groundwater protection efforts to increase incentives for groundwater pollution prevention. While some discharges may never affect groundwater, the use of the proposed effluent charge system would create a continuing incentive for dischargers to develop low-cost abatement strategies. The proposed approach is a pragmatic one, founded on the pressing need to prevent the practically irreversible destruction of crucial groundwater resources. (Sand-PTT)

5. TI: Are Ground Water Vulnerability Classification Systems Workable.
AN: W90-09503
AU: Garrett,-P.; Williams,-J.-S.; Rossoll,-C.-F.; Tolman,-A.-L.
CS: BCI Geonetics, Inc., Winslow, ME.
SO: IN: Proceedings of the FOCUS Conference on Eastern Regional Ground Water Issues. October 17-19, 1989, Kitchener, Ontario, Canada. National Water Well Association, Dublin, Ohio. 1989. p 329-343, 3 fig, 4 tab, 19 ref. PY: 1989
DE: *Classification-, *Groundwater-pollution, *Water-pollution-control
DE: Aquifers-, DRASTIC-, Geohydrology-, Groundwater-recharge, Maine-, Path-of-pollutants, Permeability-, Water-pollution-sources, Water-quality-management. CC: 06B, 05G, 02F

AB: The State of Maine evaluated both DRASTIC (a standardized method for evaluating groundwater pollution potential using geohydrologic settings) and a custom modified system to see if either could map groundwater vulnerability. The two systems were tested at known sites of groundwater contamination to determine the correlation between actual contamination and 'vulnerability'. A poor correlation was found for both systems. One reason for this seems to be that the fractured bedrock aquifer is more vulnerable than sand and gravel, as demonstrated in several independent investigations. Therefore, although a vulnerability classification systems may be useful for certain specific purposes, multi-purpose classification systems are too full of unidentified uncertainties to be useful for local decision-making, where most land use decisions are made. Other problems with vulnerability classification systems are: (1) the DRASTIC method assumes that a contaminant, with the mobility of water, is introduced at the surface; (2) both DRASTIC and the Maine Modified rating schemes assign low scores to deep water tables and high scores to permeable soils and surficial deposits. In Maine's climate, however, deep water tables are only possiable with permeable soils. Where deep water tables to occur in permeable deposits, the scores tend to counter each other. This tends to bring scores into a middle range without much discriminating power. Similarly, clays are generally recognized as low vulnerability deposits; (3) recharge versus discharge was not considered as one of the DRASTIC factors, because natural discharge can easily be revered by pumping from a well; (4) vulnerability scores are generally assigned by technicians without extensive field experience; and (5) the DRASTIC manual specifically states that the method 'is designed to evaluate groundwater pollution potential from a regional perspective and should be applied to areas 100 acres or larger in size...' This size caveat could lead to the misapplication of the method. (See also W90-09479) (Lantz-PTT).

ANEXO 2

RESULTADOS *COMENTADOS* DE UMA PESQUISA FEITA À INTERNET EM 17 DE MARÇO DE 1999, A http://altavista.digital.com/ SOBRE APLICAÇÕES DO MÉTODO DRASTIC (*i.e.* "groundwater drastic")

1. DRASTIC GROUNDWATER VULNERABILITY MAPPING OF PORTUGAL
nbsp; DRASTIC GROUNDWATER VULNERABILITY MAPPING OF
PORTUGAL. in "Groundwater: An Endangered Resource",
Proceedings of Theme C (pp. 132-137) of the 27. th.
URL: www-dh.lnec.pt/gias/novidades/DRASTIC_e.html
Last modified 3-Nov-97 - page size 18K - in English (Win-1252)

Apresentado anteriormente...

2. Resumes Symposium 97-79. The role of error propagation for integrating multisource data within spatial models: the case of the DRASTIC groundwater vulnerability model.
URL: www.crg.ulaval.ca/fr/Evenements/symposiu.../79-Fortin.html
Last modified 11-Mar-98 - page size 3K - in English

by (1) Michelle Fortin - (2) Geoffrey Edwards (1) Keith P.B. Thomson

(1) Centre de recherche en geomatique
(2) Chaire industrielle en geomatique appliquee a la foresterie
Pavillon Louis-Jacques Casault, Universite Laval, Sainte-Foy
Quebec, Canada, G1K 7P4
Phone number: (418) 656-2131 ext. 7895
Fax: (418) 656-3607
fortin@crg.ulaval.ca
Keith.Thomson@scg.ulaval.ca
Geoffrey.Edwards@scg.ulaval.ca

Key words: Error, propagation, model, groundwater vulnerability

Abstract:

An analytical error propagation model has been used to characterise the spatial distribution of error for the DRASTIC groundwater vulnerability model. The model combines three distinct error submodels, one for interpolated variables, a second for fuzzy polygon boundaries and a third for classified remote sensing data. These three models were required to characterise the large variety of source data used as input to the model, which included drill hole data, digitised maps, a digital elevation model and a classified Landsat TM image for land use. The three error models are combined using a probabilistic approach based on a first-order Taylor expansion to produce a reliability surface (root-mean-square error) which provides an upper limit on the reliability for each cell for the parameters of interest. Errors were underestimated throughout the experiment, but resulted nevertheless in a low reliability surface for the recharge parameter which formed the basis of the study. The implications of the model are discussed along with modifications for its improvement. The lack of knowledge of the spatial autocorrelation structure of the final products constitutes the most severe limitation to the model. The model provides nonetheless a useful guide to the spatial distribution of reliability in a decision-making context.

4. DRASTIC: A systematic approach to groundwater pollution potential mapping in Texas. Author: Margaret Hart, Texas Water Commission, Austin, TX. Problem: As.
URL: twri.tamu.edu/twripubs/NewWaves/v2n1/abstract-6.html
Last modified 15-Apr-98 - page size 3K - in English

Problem: As part of its statewide groundwater assessment and protection program, the Texas Water Commission has sought to develop tools to classify aquifers and evaluate their pollution potential. Although

attempts have been made to map the pollution potential of aquifers, a detailed analysis of the state's groundwater resources was needed to effectively plan for resource allocation and to delineate priority areas for monitoring and enforcement of groundwater protection rules.

DRASTIC was used to produce two Texas maps, one depicting general vulnerability to groundwater pollution, and the other specifically aimed at agricultural pollution. The next step will be to analyze the maps. Questions about the sensitivity, reproducibility, accuracy and subjectivity of the results have not been answered, and it is not yet known how well DRASTIC represents actual pollution potential.

5. Terran Corporation Golf Course Technical Bulletin
nbsp; GROUNDWATER POLLUTION POTENTIAL MAPS Using the DRASTIC system to manage turfgrass chemical applications at golf courses. Application of chemical...
URL: www.terrancorp.com/services/golf/golftec...1/bulletin1.htm
Last modified 29-Oct-98 - page size 8K - in English (Win-1252)

The map depicts the areas on a golf course with the greatest potential for pollution by surficial chemical applications. The areas with greatest potential require stricter care and management to reduce potential impact to the environment. Management for these areas may include:

- *Incorporating sensitive areas into roughs, aesthetic landscaping, or wildlife habitats in lieu of tees, greens or fairway.*
- *Reducing, substituting or eliminating chemical applications in lieu of alternative types or methods of fertilization or pest control.*
- *Revising application formulations or methodology to reduce leaching potential for sensitiveareas.*
- *Planting more drought or pest-resistant varieties of turfgrass in sensitive areas.*
- *Installing or moving chemical storage areas or underground storage tanks into areas of lesser pollution potential (if present). Alternatively, using or constructing structures of better product containment capability or release-detection capability in areas of higher pollution potential.*
- *Increased monitoring for highly sensitive areas;*
- *Modifying irrigation practices to reduce leaching potential (or reduce water-logging).*

Development of a groundwater pollution potential map in the development and planning stages of golf course construction will help in building an environmentally proactive approach to managing and designing the course. The map is also an effective tool for communicating plans, methods, and efforts for providing the best, most conscientious means to environmental protection.

6. Predicting Spatial Distributions of Vulnerability of Indiana State
Kumar C.S Navulur, Bernard A. Engel. Predicting Spatial Distributions of Vulnerability of Indiana State Aquifer Systems to Nitrate Leaching using a GIS....
URL: ncgia.ucsb.edu/conf/SANTA_FE_CD-ROM/sf_p...r/my_paper.html
Last modified 15-Apr-96 - page size 30K - in English

ABSTRACT

Regional scale analysis identifying the problem areas of nitrates leaching from agricultural management systems will aid in efficient groundwater management strategies. Preliminary screening analysis to evaluate the vulnerability of groundwater systems of Indiana to nitrate pollution was carried out using a modified DRASTIC and SEEPAGE analysis at 1:250,000 scale. The state soils geographic database (STATSGO) was used to extract the soil information required for the analysis. The accuracy of the results from the above analysis was statistically evaluated by comparing the results with groundwater quality data sampled across the state. The comparison showed a correlation coefficient of 0.67 and showed that these regional scale analyses show a great deal of potential as screening tools for policy decision making in groundwater management.

SUMMARY

Regional scale groundwater vulnerability studies to nitrate pollution from non-point sources using DRASTIC and SEEPAGE analyses were conducted at the 1:250,000 scale for Indiana. These models were integrated with the ARC/Info GIS environment. DRASTIC and SEEPAGE analyses categorized most of the Indiana aquifer systems as moderately vulnerable to pollution. Additional data layers, land use and fertilizer usage, were considered in DRASTIC and SEEPAGE in an attempt to improve the results. The results from

conventional and modified DRASTIC and SEEPAGE analyses were compared with the nitrate detections in well water quality samples across the states. The results indicated that the models performed well in predicting the sites with high and very high nitrate detections.
The groundwater vulnerability within Indiana to pesticide and nitrate pollution potential was evaluated using a Geographic

7. Drastic: A Regional Scale Model About Drastic. Very few models such as DRASTIC are available to estimate the vulnerability of groundwater to contamination on a regional scale.
URL: pasture.ecn.purdue.edu/~caagis/tgis/cases/gwq/drasGWQ.html
Last modified 11-Aug-98 - page size 2K - in English

Very few models such as DRASTIC are available to estimate the vulnerability of groundwater to contamination on a regional scale. These models can be used for the preliminary screening of the areas susceptible to severe or high contamination. In this research the models DRASTIC, SEEPAGE, and SPISP are used for preparing the initial vulnerability maps.

DRASTIC

DRASTIC is an empirical model developed by EPA in 1980's to evaluate groundwater pollution potential (Aller et al. 1987). This model includes various hydrogeologic settings whose physical characteristics affect the groundwater quality on a regional basis (Aller. et al., 1990). This is a numerical ranking system that applies a relative ranking scheme to the hydrogeologic settings to obtain a measure of relative groundwater pollution potential. DRASTIC maps were produced from the 1:2,000,000 scale data (Aller, et al., 1987). The U.S. Environmental Protection Agency (USEPA, 1992) found that these maps did not correlate well with the water quality analysis performed in the National Survey for Pesticides in Drinking Water.

http://pasture.ecn.purdue.edu/~caagis/tgis/cases/gwq/objectGWQ.html

ABSTRACT

Information System (GIS) environment. The ARC/Info and GRASS GIS environment was used to carry out the analyses and to identify and display the groundwater regions sensitive to potential pesticide and nitrate pollution as a result of non-point sources. The STATSGO database was employed to retrieve statewide soils information required for the analysis. The information was used within three models. The model used in this case study was DRASTIC. This model considers various hydrogeologic settings that affect the groundwater quality of a region. The results were compared with existing nitrate contamination in well water data to determine the accuracy of the results. The modified DRASTIC maps show a great deal of potential as screening tools for policy decision making in groundwater management. While a model like DRASTIC can be used to identify problem areas in general, more detailed examination may be necessary to suggest conservation practices which could lessen the problem. Detailed models like GLEAMS and NLEAP are more suitable for these purposes. As more data becomes available, GLEAMS and NLEAP can be applied to larger areas. Efforts are underway to determine the spatial and scale variability of inputs on such models which will lead to specific criteria with regards to level of detail of inputs required for conducting regional scale analyses. Efforts are also underway to develop groundwater vulnerability maps using NLEAP in an attempt to further improve estimates of groundwater vulnerability to nitrates. More detailed models including GLEAMS are also being integrated with GIS to assist in better understanding areas of disagreement between observed water quality and predicted vulnerability and to predict vulnerability of small areas.
Statistics, Geary ratio and Moran coefficient were computed to assess the spatial auto-correlation of nitrate detections.
The results indicated that spatial correlation exits between the occurrences of nitrate pollution. This suggests that regional-scale factors and processes are of importance and indicating that non-point sources of nitrates are important to the quality of groundwater.

The modified DRASTIC and SEEPAGE analysis show a great deal of potential as screening tools for policy decision making in groundwater management. These analyses should not be used to replace detailed studies but should be applied to screen areas of high and very high vulnerability that a site-specialist should concentrate on. These analyses can be further modified by including additional data showing the excess amount of nitrate applied, crop rotations, and livestock nutrient value applied to farms. It is anticipated that this will improve the accuracy of the vulnerability estimates.

GIS are an effective tool for carrying out groundwater vulnerability studies. The integration of the groundwater quality models within the GIS environment results in easy implementation of the analyses for different agricultural management practices. Automated data extraction to develop data layers required for the DRASTIC and SEEPAGE analysis from the STATSGO database will enable analysis for the whole Unites States at a 1:250,000 scale. When more data becomes available, the field scale simulations of more detailed models like NLEAP can be used for regional scale studies. It is anticipated that the studies on the spatial and scale variability of inputs on field scale models will lead to specific criteria with regards to level of detail of inputs required for conducting regional scale analyses.

8. Drastic Map
The DRASTIC maps, produced by the Ohio Department of Natural Resources, show the pollution potential for groundwater systems.
URL: www.gwconsortium.org/DRASTIC.html
Last modified 25-Nov-98 - page size 5K - in English (Win-1252)

9. SPATIAL/GIS DATABASES
Nebraska Natural Resources Commission Data Bank. SPATIAL/GIS DATABASES. Digital Elevation Models (DEM) Digital Orthophoto Quadrangles (DOQ) Groundwater...
URL: www.nrc.state.ne.us/databank/spat.html
Last modified 3-Nov-98 - page size 6K - in English

10. "DRASTIC Methodology Nebraska Natural Resources Commission Data Bank. "DRASTIC" Methodology.
URL: www.nrc.state.ne.us/data/nrd/drast_doc.html
Last modified 22-Aug-96

One of the tools created for the purpose of groundwater protection in the United States is a methodology referred to as "DRASTIC," developed as the result of a cooperative agreement between the National Water Well Association (NWWA) and the U.S. Environmental Protection Agency (EPA). The procedure was designed to provide for systematic evaluation of groundwater-pollution potential in any hydrogeologic setting.

STATEWIDE IMPLEMENTATION: CALMIT and DEC undertook a cooperative project in 1988 aimed at production of DRASTIC maps at 1:250,000 for all of Nebraska. The procedures employed in the statewide project, which were again based upon use of the Erdas-GIS software, are summarized below.

11. DRASTIC maps
Animated DRASTIC maps.
URL: water.ccwr.ac.za/~lynch2/drasticp.html
Last modified 8-Sep-97 - page size 972 bytes - in English

12. DRASTIC Groundwater vulnerability mapping by DRASTIC. Description. Groundwater ressources are scarce, and should be carefully protected against over-exploitation..
URL: www.crpht.lu/CIMTEL/LASP/competencies/environ/drastic.html
Last modified 5-Dec-97 - page size 3K - in English [Translate]

13. Groundwater Vulnerability to Contamination Using the DRASTIC Method by Natural Resources District(NRD) Tips to Download Data Coverage Drastic Methodology..
URL: www.nrc.state.ne.us/databank/drastic.html
Last modified 28-Oct-98 - page size 3K - in English [Translate]

14. C:\DOCUMENT\ESRI94\DRASTIC.TXT
PREPARING INPUT DATA FOR A NATIONAL-SCALE GROUNDWATER VULNERABILITY MAP OF SOUTHERN AFRICA.
SD Lynch1* AG Reynders2RE Schulze1.
URL: www.ccwr.ac.za/~lynch2/drastica.html
Last modified 25-Feb-98 - page size 3K - in English [Translate]

15. C:\DOCUMENT\ESRI94\DRASTIC.TXT
PREPARING INPUT DATA FOR A NATIONAL-SCALE GROUNDWATER VULNERABILITY MAP

OF SOUTHERN AFRICA. SD Lynch1* AG Reynders2RE Schulze1. URL: www.ccwr.ac.za/~lynch2/drastic.html
Last modified 8-Sep-97 - page size 24K - in English [Translate]

16. STEVE LYNCH -- GIS DATA
STEVE LYNCH -- GIS DATA. University of Natal,Private Bag X01,Scottsville 3209, Pietermaritzburg. Phone (0331)260-5490. Fax: (0331)260-54818. Southern...
URL: water.ccwr.ac.za/~lynch2/data.html
Last modified 24-Oct-97 - page size 2K - in English [Translate]

17. DRASTIC GFX
Groundwater vulnerability mapping by DRASTIC. Courtesy by Dr. Ing. J.P. Lobo-Ferreira National Laboratory of Civil Engineering Hydraulics Department -...
URL: www.crpht.lu/CIMTEL/LASP/competencies/environ/drastgfx.html
Last modified 5-Dec-97 - page size 895 bytes - in English
Groundwater vulnerability mapping by DRASTIC
Description
Groundwater ressources are scarce, and should be carefully protected against over-exploitation and pollution. Evaluating and mapping of vulnerability to pollution is a usefull tool for groundwater resource management. The figure illustrates the DRASTIC index method. The map is showing a part of the coastal zone of Portugal. This map has been worked out by the Groundwater Research Group (GIAS) at the National Laboratory for Civil Engineering (LNEC) in Lisbon/Portugal.

18. DRASTIC
DRASTIC is a groundwater quality model for evaluating the pollution potential of large areas using the hydrogeologic settings of the region (Aller et al.,.
URL: pasture.ecn.purdue.edu/~caagis/tgis/cases/gwq/drastic.html
Last modified 11-Aug-98 - page size 5K - in English

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAPÍTULO PRIMEIRO - APRESENTAÇÃO GERAL

LEITÃO, T.E. (1997) - "Metodologias para a Reabilitação de Aquíferos Poluídos". Tese de Doutoramento apresentada à Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, publicada nas Teses e Programas de Investigação do LNEC, TPI 11, ISBN 972-49-1733-9, Lisboa, 1997, 493 pp.

LOBO-FERREIRA, J. P., MOINANTE, M. J., ZABEL, T., CLARK, L., BUCKLAND, J., FRANCE, S., VOGEL, W., GRATH, J., SCHWAIGER, K., KOREIMANN, C., GRAVESEN, P. e NIGGARD, E. (1996) - "Revised Version of the Final Report on the Evaluation of the Costs of Groundwater Inspection in the Member States". Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), WRc, AWW and DGU, July 1996.

LOBO-FERREIRA, J.P. (1998) - "Relato do Tema 5" do 4º Congresso da Água da APRH: "Águas Subterrâneas", in 4º Congresso da Água: "A Água como Recurso Estruturante do Desenvolvimento". Publicação em CD-ROM, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Março de 1998.

LOBO-FERREIRA, J.P. e CIABATTI, P. (1996) - "Recomendações para a Protecção e Gestão Integrada de Captações de Águas Subterrâneas em Portugal". Comunicação Convidada ao 3º Congresso da Água, organizado pela Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, em Lisboa, de 25 a 29 de Março de 1996.

LOBO-FERREIRA, J.P., NOVO. M. E, LEITÃO, T. E. e TORE, C. (1995c) - "Desenvolvimento de um Inventário das Águas Subterrâneas de Portugal. Volume 3: (1) Avaliação da Recarga dos Aquíferos da Ilha de São Miguel. (2) Avaliação dos Recursos Hídricos Subterrâneos da Ilha da Madeira. (3) Aplicação da Metodologia DRASTIC na Determinação do Zonamento da Vulnerabilidade à Poluição dos Aquíferos da Ilha da Madeira. (4) Caracterização Qualitativa, Quantitativa e de Vulnerabilidade à Poluição dos Aquíferos Cársicos de Portugal". Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1995, 542 pp.

LOBO-FERREIRA, J.P., OLIVEIRA, M.M. e CIABATTI, P.C. (1995a) - "Desenvolvimento de um Inventário das Águas Subterrâneas de Portugal. Volume 1: (1) Caracterização dos Recursos Hídricos Subterrâneos e Mapeamento DRASTIC da Vulnerabilidade dos Aquíferos de Portugal. (2) Executive Summary of the Final Report on the Characterisation of Groundwater Resources and DRASTIC Vulnerability Mapping of the Aquifers of Portugal. (3) Síntese da Caracterização e do Mapeamento das Águas Subterrâneas de Portugal. (4) Análise de Legislação sobre Zonamento de Protecção de Captações de Águas Subterrâneas. Aplicação a Dois Casos de Estudo Portugueses". Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1995, 525 pp. (*cf.* http://www-dh.lnec.pt/gias/estudos /inventE.html).

LOBO-FERREIRA, J.P., OLIVEIRA, M.M. e MOINANTE, M. J. (1995b) - "Desenvolvimento de um Inventário das Águas Subterrâneas de Portugal. Volume 2: (1) Caracterização do Estado das Águas Subterrâneas em Relação à Poluição Causada por Nitratos. (2) Metodologias de Análise da Recarga de Aquíferos. (3) Caracterização dos Sistemas Hidrogeológicos de Portugal Continental e Avaliação das suas Reservas Hídricas". Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1995, 514 pp.

LOBO-FERREIRA, J.P., OLIVEIRA, M.M., MOINANTE, M.J., THEVES, T. e DIAMANTINO, C. (1995d) "Mapeamento das Águas Subterrâneas da Faixa Costeira Litoral e da Vulnerabilidade dos seus Aquíferos à Poluição. Relatório Específico R3.3". LNEC, Relatório 237/95 - GIAS, 585 pp., Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

LOBO-FERREIRA, J.P., RIBEIRO, L. e ALMEIDA, C.A. (1995e) - "Requirements for Density, Sampling Frequency, Data Storage and Estimate Costs of Groundwater Quantity Monitoring. Final Report of the Project MW3 - Task 9d". Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, CVRM/IST, FCUL, INAG, European Topic Centre on Inland Waters under Contract to the European Environment Agency.

LOBO-FERREIRA, J. P. (1999) - "Inventariando, Monitorizando e Gerindo de Forma Sustentável Recursos Hídricos Subterrâneos. A Situação Portuguesa, os Desafios da União Europeia e a

Globalização". Lisboa, LNEC, Programa de Investigação apresentado a concurso para acesso à categoria de Investigador-Coordenador do Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

CAPÍTULO SEGUNDO - RECARGA DE AQUÍFEROS E AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE À POLUIÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

ALBINET, M. e MARGAT, J. (1970) "Cartographie de la vulnérabilité a la pollution des nappes d'eau souterraine", Bull. BRGM 2me Series 3 (4).

ALLER, L., BENNET, T., LEHR, J.H. e PETTY, R.J. (1987) - "DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings", U.S. EPA Report 600/2-85/018.

ALMEIDA, C.A.C. (1985) - "Hidrogeologia do Algarve Central". Lisboa, Dissertação apresentada à Universidade de Lisboa para obtenção do grau de Doutor em Geologia.

ANDRADE AFONSO, A. R., GONÇALVES, R. M. D. e MENDES VICTOR, L. A. (1998) - "A geofísica na detecção e parametrização de aquíferos - Algumas aplicações". Lisboa, 4º Congrsso da Água da APRH.

ANDRESEN, L.J. e GOSK, E. (1987) - "Applicability of vulnerability maps", *in* W. van DUIJVANBOODEN AND H.G. VAN WAEGENINGH (Eds.), *Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollution,* Proceedings and Information No. 38 of the International Conference held in the Netherlands, in 1987, TNO Committee on Hydrological Research, Delft, The Netherlands.

AUST, H., H. VIERHUFF e WAGNER, W. (1980) - "Grundwasservorkommen in der Bundesrepublik Deutschland".

CANDEIAS, I.R.R. e Lourenço da SILVA, M. (1998) - "Avaliação dos Recursos Hídricos Subterrâneos e Caracterização Hidráulica da Formação". Publicação em CD-ROM, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Março de 1998.

CANTER, L., KNOX, R. e FAIRCHIELD, D. (1987) - "Ground Water Quality Protection", Lewis Publishers, Inc., Chelsea, Mi.

CEDEX (1998) - "Estudio Hidroquímico e isotópico de las agua subterráneas aguas abajo del futuro embalse de Alqueva (Portugal) sobre el Río Guadiana. Informe parcial, tomo único". Madrid, Centro de Estudios de Técnicas Aplicada, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), Abril.

CIABATTI, P.C. e LOBO-FERREIRA, J.P. (1994) - "Desenvolvimento de um Inventário das Águas Subterrâneas de Portugal. Análise da Legislação sobre Zonamento de Protecção de Captações de Água Subterrânea. Aplicação a dois Casos de Estudo Portugueses". Lisboa, LNEC, Relatório 247/94 - GIAS, 89 pp.

COSTA, F.E., BRITES, J.A., PEDROSA, M.Y. e SILVA, A. V. (1985) - "Carta Hidrogeológica da Orla Algarvia". Lisboa, Serviços Geológicos de Portugal.

COOPER, B, NAVALUR, K, ENGEL, B. e HAHAN, L. (1999) - "Groundwater vulnerability evaluation to pesticide and nitrate pollution on a regional scale usig GIS", in http://soils/ecn.purdue.edu/~aggrass/GROUNDWATER/tip.gif. Department of Agricultural and Biological Engineering, Purdue University, Indiana, USA.

CUSTODIO, E. e LLAMAS, M.R. (1976) - "Hidrología Subterránea". 1ª Edição, Barcelona, Ediciones Omega, S.A., 1976, 1157 pp.

DAGAN, G. (1982) - "Analysis of Flow through Homogeneous Random Aquifers: 2. Unsteady Flow in Confined Formations". Water Resources Research, 18(5), pp. 1571-1585.

DELGADO-RODRIGUES, J.D., LOBO-FERREIRA, J.P., SANTOS, J.B e MIGUÉNS, N. (1989) - "Caracterização sumária do recursos hídricos subterrâneos de Portugal". Memória No. 735, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa e *in Groundwater in Western Europe*, Natural Resources Water Series, No. 27, 1992, United Nations, New York.

DELGADO-RODROGUES, J. e ROQUE, A. (1990) - "Inventário dos Recursos Hídricos Subterrâneos do Algarve e Alentejo". Lisboa, Relatório 97/90 - NP.

DIAMANTINO, C. e LOBO-FERREIRA, J.P. (1996) - "Caracterização da Intrusão Salina na Faixa Costeira de Portugal Continental". Lisboa, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Anais do 3º Congresso da Água, 1996.

DUIJVENBOODEN, W. van e WAEGENINGH, H.G. van (1987) - "Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants". Proceedings and Information No. 38 of the International Conference

held in the Netherlands, in 1987, TNO Committee on Hydrological Research, Delft, The Netherlands.

FOSTER, S.S.D. (1987) - "Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy", *in* W. van Duijvanbooden and H.G. van Waegeningh (eds.), *Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollution*, Proceedings and Information No. 38 of the International Conference held in the Netherlands, in 1987, TNO Committee on Hydrological Research, Delft, The Netherlands.

FRIED, J.J. (1987) - "Groundwater resources in the European Community, 2nd phase: Vulnerability - Quality" (documento de trablho não publicado).

GONÇALVES, R. M. D. e ANDRADE AFONSO, A. R. (1998) - "A geofísica na protecção dos recursos hídricos. Mapeamento de zonas de risco do Vale do Tejo-Sado recorrendo a prospecção geoeléctrica". Lisboa, 4º Congrsso da Água da APRH.

HAERTLE, A. (1983) - "Method of working and employment of EDP during the preparation of groundwater vulnerability maps". IAHS Publ. 142(2).

HASHIMOTO, T., STEDINGER, J.R. e LOUCKS, D.P. (1982) - "Reliability, Resiliency, and Vulnerability Criteria for Water Resource System Performance Evaluation". Water Resources Research, 18(1), p14-20.

INAG (1997) - "Definição, Caracterização e Cartografia dos Sistemas Aquíferos de Portugal Continental". Estudo Coordenado pelo Prof. C. A. Costa Almeida, Faculdade de Ciências de Lisboa e Instituto da Água, 236 pp.

Le GRAND, H.E. (1983) - "A standardized system for evaluating waste disposal sites". NWWA, Worthington, Ohio.

LENCASTRE, A. e FRANCO, F.M. (1984) - "Lições de Hidrologia". Universidade Nova de Lisboa, 451 pp.

LINSLEY, JR., R.K., KOHLER, M.A. e PAULHUS, J.L.H. (1975) - "Hydrology for Engineers". Second Edition. McGraw Hill Kogakusha, Ltd.

LOBO-FERREIRA, J.P. (1981) - "Mathematical Model for the Evaluation of the Recharge of Aquifers in Semiarid Regions with Lack of Hydrological Data", in "Proceedings of EUROMECH 143, Flow and Transport in Porous Media". Rotherdam, A. A. Balkema, 1981, e Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Memória nº 582, 1982.

LOBO-FERREIRA, J.P., MELO BAPTISTA, J., DELGADO RODRIGUES, J. e VEIGA DA CUNHA, L. (1981) - "Estudo Global dos Recursos Hídricos da Ilha do Porto Santo". Lisboa, LNEC, Relatório - NHHF, 1981.

LOBO-FERREIRA, J.P. (1982a) - "Estudo da Erosão do Solo da Ilha do Porto Santo". Lisboa, LNEC, Relatório - NHHF, 1982.

LOBO-FERREIRA, J.P. (1982b) - "Actualização do Estudo Hidrológico da Bacia Hidrográfica do Rio Maior". Lisboa, LNEC, Relatório - NHHF, 1982.

LOBO-FERREIRA, J.P. e DELGADO-RODRIGUES, J. (1988) - BALSEQ - "A model for the estimation of water balances, including aquifer recharge, requiring scarce hydrogeological data", *in* E. Simmers (Ed.) *Estimation of Natural Groundwater Recharge*. Dordrecht, D. Reidel, NATO ASI Series Vol. 222.

LOBO-FERREIRA, J.P. e CALADO, F. (1989) - "Avaliação da Vulnerabilidade à Poluição e Qualidade das Águas Subterrâneas de Portugal". Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

LOBO-FERREIRA, J.P. e CABRAL, M. (1991) - "Proposal for an Operational Definition of Vulnerability for the European Community's Atlas of Groundwater Resources", *in Meeting of the European Institute for Water*, Groundwater Work Group Brussels, Feb. 1991.

LOBO-FERREIRA, J. P. e OLIVEIRA, M.M. (1993a) - "Desenvolvimento de um Inventário das Águas Subterrâneas de Portugal - Caracterização dos Recursos Hídricos Subterrâneos e Mapeamento DRASTIC da Vulnerabilidade dos Aquíferos de Portugal. Relatório de Progresso". Relatório nº 137/93 - GIAS.

LOBO-FERREIRA, J. P. e OLIVEIRA, M.M. (1993b) - "Desenvolvimento de um Inventário das Águas Subterrâneas de Portugal - Caracterização dos Recursos Hídricos Subterrâneos e Mapeamento DRASTIC da Vulnerabilidade dos Aquíferos de Portugal. Relatório Final". Relatório nº 179/93 - GIAS.

LOBO-FERREIRA, J.P. (1993c) - "Development of an Inventory of the Groundwater Resources of Portugal. Characterization of Groundwater Resources and DRASTIC Vulnerability Mapping of the Aquifers of Portugal". Comunicação apresentada à reunião de Peritos Nacionais de Águas Subterrâneas realizada em Bruxelas, em Dezembro de 1993.

LOBO-FERREIRA, J.P. e OLIVEIRA, M.M. (1994) - "Síntese da Caracterização e do Mapeamento das Águas Subterrâneas de Portugal". Lisboa, LNEC, Relatório 68/94 - GIAS, 50 pp.

LOBO-FERREIRA, J.P. e OLIVEIRA, M.M. (1994b) - "EIA Integrado para o Empreendimento do Alqueva. Análise dos Aquíferos da Zona do Perímetro de Rega, em Particular da sua Produtividade e Vulnerabilidade à Poluição". Lisboa, LNEC, Relatório 300/94 - GIAS, 35 pp.

LOBO-FERREIRA, J.P., MOINANTE, M.J. e OLIVEIRA, M.M. (1994) - "Caracterização Geral, com Incidência no Meio Subterrâneo, da Faixa Litoral de Portugal Continental. 2º Relatório de Progresso". Lisboa, LNEC, Relatório 332/94 - GIAS, 107 pp.

LOBO-FERREIRA, J.P., OLIVEIRA, M. M. e CIABATTI, P.C. (1995) - "Desenvolvimento de um Inventário da Águas Subterrâneas de Portugal. Volume 1". Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa (*cf.* http://www-dh.lnec.pt/gias/estudos /inventE.html).

LOBO-FERREIRA, J.P., OLIVEIRA, M.M. e CIABATTI, P.C. (1995a) - "Desenvolvimento de um Inventário das Águas Subterrâneas de Portugal. Volume 1: (1) Caracterização dos Recursos Hídricos Subterrâneos e Mapeamento DRASTIC da Vulnerabilidade dos Aquíferos de Portugal. (2) Executive Summary of the Final Report on the Characterisation of Groundwater Resources and DRASTIC Vulnerability Mapping of the Aquifers of Portugal. (3) Síntese da Caracterização e do Mapeamento das Águas Subterrâneas de Portugal. (4) Análise de Legislação sobre Zonamento de Protecção de Captações de Águas Subterrâneas. Aplicação a Dois Casos de Estudo Portugueses". Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1995, 525 pp. (*cf.* http://www-dh.lnec.pt/gias/estudos /inventE.html).

LOBO-FERREIRA, J.P., OLIVEIRA, M.M. e MOINANTE, M. J. (1995b) - "Desenvolvimento de um Inventário das Águas Subterrâneas de Portugal. Volume 2: (1) Caracterização do Estado das Águas Subterrâneas em Relação à Poluição Causada por Nitratos. (2) Metodologias de Análise da Recarga de Aquíferos. (3) Caracterização dos Sistemas Hidrogeológicos de Portugal Continental e Avaliação das suas Reservas Hídricas". Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1995, 514 pp.

LOBO-FERREIRA, J.P., NOVO. M. E, LEITÃO, T. E. e TORE, C. (1995c) - "Desenvolvimento de um Inventário das Águas Subterrâneas de Portugal. Volume 3: (1) Avaliação da Recarga dos Aquíferos da Ilha de São Miguel. (2) Avaliação dos Recursos Hídricos Subterrâneos da Ilha da Madeira. (3) Aplicação da Metodologia DRASTIC na Determinação do Zonamento da Vulnerabilidade à Poluição dos Aquíferos da Ilha da Madeira. (4) Caracterização Qualitativa, Quantitativa e de Vulnerabilidade à Poluição dos Aquíferos Cársicos de Portugal". Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1995, 542 pp.

LOBO-FERREIRA, J.P., OLIVEIRA, M.M., MOINANTE, M.J., THEVES, T. e DIAMANTINO, C. (1995d) - "Mapeamento das Águas Subterrâneas da Faixa Costeira Litoral e da Vulnerabilidade dos seus Aquíferos à Poluição. Relatório Específico R3.3". LNEC, Relatório 237/95 - GIAS, 585 pp., Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

LOBO-FERREIRA, J.P., OLIVEIRA, M.M., MOINANTE, M.J., THEVES, T. e DIAMANTINO, C. (1995e) - "Avaliação da Vulnerabilidade da Capacidade de Recepção das Águas e Zonas Costeiras. Meios Receptores e Suas Características: Meios Subterrâneos - Mapeamento das Águas Subterrâneas da Faixa Costeira Litoral e da Vulnerabilidade dos seus Aquíferos à Poluição. Relatório Específico R3.3". Lisboa, LNEC, Relatório 237/95 - GIAS, 585 pp.

LOBO-FERREIRA J. P. (1998) - "Vulnerabilidade à poluição de águas subterrâneas: Fundamentos e conceitos para uma melhor gestão e protecção dos aquíferos de Portugal". Lisboa, 4º Congresso da Água da APRH.

LOBO-FERREIRA, J.P., OLIVEIRA, M.M., LEITÃO, T.E., NOVO, M.E., MOINANTE, M.J., MOREIRA, P. e HENRIQUES, M. J. (1999) - "Caracterização dos Recursos Hídricos Subterrâneos da Área Abrangida pelo Plano de Bacia Hidrográfica do Rio Tejo. Anexo Temático 10 - Qualidade dos Meios Hídricos. Tomo 10B - Qualidade das Águas Subterrâneas". Relatório Final da Fase 1. Março de 1999, 117 pp.

LYNCH, S.D., REYNDERS, A.G. e SCHULZ, R.R. (1993) - "Preparing input data for a national-scale groundwater vulnerability map of Southern Africa", *in 6th National Hydrological Symposium*, SANCIAHS, Sept. 1993.

LYNCH, S.D., REYNDERS, A.G. e SCHULZ, R.R. (1994) - "Preparing input data for a national-scale groundwater vulnerability map of Southern Africa", *in* Water S.A. (1994) 20, 239-246, Pietermaritzburg, South Africa.

MERCHANT, J.W. (1994) - "GIS-Based Groundwater Pollution Hazard Assessment: A Critical Review of the DRASTIC Model". Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 60, No. 9, pp. 1117-1127.

MOINANTE, M.J., OLIVEIRA, M.M. e LOBO-FERREIRA, J.P. (1994) - "Desenvolvimento de um Inventário das Águas Subterrâneas de Portugal. Caracterização dos Sistemas Hidrogeológicos de Portugal Continental e Avaliação das suas Reservas Hídricas". Lisboa, LNEC, Relatório 329/94 -

GIAS, 262 pp.
NAPOLITANO, P. (1995) - "Aquifer Vulnerability Assessment in the Piana Campana, Southern Italy, using the DRASTIC and SINTACS methods". Enschede, Holanda, M.Sc. Thesis in geological Survey. Conferência realizada no CVRM, Instituto Superior Técnico de Lisboa.
NAVALUR, K.C.S. e ENGEL, B.A. (1997) - "Predicting spatial distribution of vulnerability of Indiana State Aquifer system to nitate leaching using a GIS", *in* http://ncgia.ucsb.edu/conf/SANTA_FE_CD-ROM/sf_papers/navulur_kumar/my_paper.html
NOVO, M.E., ROQUE, A., CABRAL, MARIZA, JORGE, C. e LOBO-FERREIRA, J.P. (1991) - "Inventário dos Recursos Hídricos Subterrâneos. Caracterização da Qualidade das Águas e Vulnerabilidade dos Aquíferos da Região Centro". Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Relatório 213/91-GIAS/NP.
NOVO, M.E., LEITÃO, T.E., TORE, C. e LOBO-FERREIRA, J.P. (1994a) - "Avaliação dos Recursos Hídricos Subterrâneos da Ilha da Madeira. Relatório Final". Lisboa, LNEC, Relatório 99/94 - GIAS, 159 pp.
NOVO, M.E. (1994) - "Desenvolvimento de um Inventário das Águas Subterrâneas de Portugal. Caracterização Qualitativa, Quantitativa e de Vulnerabilidade à Poluição dos Aquíferos Cársicos de Portugal". Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Relatório 250/94 - GIAS.
OLIVEIRA, M. M. e LOBO-FERREIRA, 1994 - "Desenvolvimento de um Inventário das Águas Subterrâneas de Portugal: Metodologias de Análise da Recarga de Aquíferos". Lisboa, LNEC, Relatório 319/94 - GIAS.
OLIVEIRA, M.M., LOBO-FERREIRA, J.P., MOINANTE, M.J. e THEVES, T. (1996a) - "Vulnerabilidade à Poluição dos Aquíferos Superficiais da Faixa Costeira de Portugal Continental Utilizando o Método DRASTIC: Caracterização da Faixa Costeira entre Estarreja e Aveiro", in "Seminário sobre Recursos Hídricos Subterrâneos em Portugal: Quantidade e Qualidade, organizado pela Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, em Lisboa, em 17 e 18 de Janeiro de 1996.
OLIVEIRA, M.M., LOBO-FERREIRA, J.P. e MOINANTE, M.J. (1996b) - "Vulnerabilidade à Poluição dos Aquíferos Superficiais da Faixa Costeira de Portugal Continental Utilizando o Método DRASTIC: Caracterização dos Parâmetros DRASTIC". Lisboa, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Anais do 3º Congresso da Água, 1996.
OLIVEIRA, M. M., MOINANTE, M.J. e LOBO-FERREIRA, J. P. (1997a) - "Cartografia Automática da Vulnerabilidade de Aquíferos com Base na Aplicação do Método DRASTIC. Relatório Final". Lisboa, LNEC, Relatório 60/97 - GIAS, 535 pp.
OLIVEIRA, M.M., MOINANTE, M.J. e LOBO-FERREIRA, J.P. (1997b) - "Determinação da Recarga de Águas Subterrâneas a Partir da Análise de Hidrogramas de Escoamento", in Seminário sobre "Águas Subterrâneas", Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Lisboa, 10 a 12 de Dezembro de 1997, 14 pp.
OLIVEIRA, M.M. (1997) - "DECHIDR.BAS - Um programa de computador para estimar a recarga de águas subterrâneas a partir da análise de hidrogramas de escoamento". Seminário sobre Águas Subterrâneas, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Lisboa, 10 a 12 de Dezembro de 1997.
OLIVEIRA, M.M. e LOBO-FERREIRA, J.P. (1998) - "Cartografia Automática da Vulnerabilidade de Aquíferos com Base na Aplicação do Método DRASTIC". Lisboa, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Anais do IV Congresso da Água, Mar. 1998.
OLIVEIRA, M.M. (1998) - DECHIDR.BAS - "Um Programa de Computador para Estimar a Recarga de Águas Subterrâneas a partir da Análise de Hidrogramas de Escoamento". Lisboa, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Anais do IV Congresso da Água, Mar. 1998.
PARASCANDOLA, M.-F. (1979) - "Carte de classification des terrains en fonction de leur vulnérabilié - vallée du Rhône entre Valence et Orange, du Viverai, du Vercors, du Dévoluy et des Baronnies". Travaux de thése Univ. Science et Technique de Montpellier.Edition BRGM.
PITEAU e TURNER (1993) - "Groundwater Mapping and Assessment in British Columbia. Volume I: Review and Recommendations". Piteau Associates Engineering Lda. e Turner Groundwater Consultants, Oct. 1993.
REIS, M.E.D. (1993) - "Estudo Hidrogeológico das Formações do Lias-Dogger situadas a Ocidente do Rio Arade (Algarve)". Lisboa, Dissertação apresentada à Universidade de Lisboa para obtenção do grau de Mestre em Geologia Económica e Aplicada.
RUBIN, Y. e DAGAN, G. (1987a) - "Stochastic identification of Transmissivity and Effective Recharge in Steady Flow: 1. Theory". Water Resources Research, 23(7), pp. 1185-1192.
RUBIN, Y. e DAGAN, G. (1987b) - "Stochastic identification of Transmissivity and Effective Recharge in Steady Flow: 2. Case Study". Water Resources Research, 23(7), pp. 1193-1200.

RUTLEDGE, A.T. e DANIEL, C.C. (1994) - "Testing and automated method to estimate ground-water recharge from streamflow records". Ground Water, 32 (2), pp. 180-189.

SGP (1972) - "Carta Geológica de Portugal à Escala 1/500 000", Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.

SHIRMOHAMMADI, A., KNISEL, W.G. e SHERIDAN, J.M. (1984) - "An approximate method for partitioning daily streamflow data". Journal of Hydrology, 74, pp. 335-354.

VAN STEMPVOORT, D., EWERT, L., WASSENAAR, L. (1992) - "AVI: A Method for Groundwater Protection Mapping in the Prairie Provinces of Canada". PPWD pilot project, Sept. 1991 - March 1992. Groundwater and Contaminants Project, Environmental Sciences Division, National Hydrology Research Institute. 23 pp.

VERMEULEN, H., LOBO-FERREIRA. J.P. e OLIVEIRA,M.M. (1993) - "A Method for Estimating Aquifer Recharge in DRASTIC Vulnerability Mapping". Comunicação apresentada ao Seminário "Águas Subterrâneas e Ambiente", realizado pela Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos (APRH) em Lisboa, Maio de 1993 e à "Second European Conference on Advances in Water Resources Technology and Management", realizada em Lisboa em Junho de 1994. Rotterdam, A.A. Balkema, European Water Resources Association.

VERMEULEN, H., LOBO-FERREIRA, J.P. e OLIVEIRA, M. M. (1994) - "A Method for Estimating Aquifer Recharge in DRASTIC Vulnerability Mapping", *in Second European Conference on Advances in Water Resources Technology and Management*, held in Lisboa, June 1994, A.A. Balkema and E.W.R.A., Rotterdam.

VILLUMSEN, A., JACOBSEN, O.S. e SONDERSKOV, C. (1982) - "Mapping the vulnerability of groundwater reservoirs with regard to surface pollution". Geologic Survey of Denmark, Yearbook 1982, Copenhagen.

CAPÍTULO TERCEIRO - MONITORIZAÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

ALLER, L., BENNETT, T. W., HACKETT, G., PETTY, R. J., LEHR, J. H., SEDORIS, H., NIELSEN, D. M., DENNE, J. E. (1989) - "Handbook of Suggested Practices for the Design and Installation of Ground-Water Monitoring Wells". U.S. Environmental Protection Agency, EPA 600/4-89/034, pp. 398.

CANTER, L. W., KNOW, R. C. e FAIRCHILD, D. M. (1987) - "Ground Water Quality Protection". Michigan, Lewis Publishers, Inc., 1987, 562 pp.

CLARK, L. (1992) - "Monitoring and Protecting Ground Water Quality". Pollution Prevention, Vol. 3, Issue 4, pp. 51-56.

CUPETO, C. e LOPES, A.R. (1999) - "Apresentação do Plano Nacional de Monitorização de Águas Subterrâneas", *in* "Sessão Pública de Apresentação e Exposição do Plano Nacional da Água e dos Planos de Bacia Hidrográfica", CCB, Lisboa, 14 de Abril, 1999.

DELGADO RODRIGUES, J., LOBO-FERREIRA, J.P., SANTOS, J. B. e MIGUÉNS, N. (1989) - "Caracterização Sumária dos Recursos Hídricos Subterrâneos de Portugal Continental". Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Memória nº 735, 1989.

JEDLITSCHKA (1992) - "Groundwater Monitoring in Germany, in Preparation of a network on monitoring. EC groundwater action plan. Coordinated groundwater monitoring". Final Report co-ordinated by J. Ganoulis, Institut Europeen de L'Eau, Brussels, Set. 1992.

LEITÃO, T.E. (1997) - "Metodologias para a Reabilitação de Aquíferos Poluídos". Tese de Doutoramento apresentada à Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, publicada nas Teses e Programas de Investigação do LNEC, TPI 11, ISBN 972-49-1733-9, Lisboa, 1997, 493 pp.

LEITÃO, T.E., LOBO-FERREIRA, J.P. e INÁCIO, M. (1994) - "Metodologias para a Recuperação de Águas Subterrâneas e Solos Contaminados. Relatório Final das Partes C, D, E e F". Lisboa, LNEC, Relatório (LNEC/DGA) 145/94 - GIAS, 190 pp.

LEITÃO, T.E., ZUNGAILIA, E. JR. e LOBO-FERREIRA, J.P. (1992) - "Metodologias para a Recuperação de Águas Subterrâneas e Solos Contaminados. Partes A e B". Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil e Direcção-Geral da Qualidade do Ambiente, 1992, pp.107.

LOBO-FERREIRA J.P. e OLIVEIRA, M.M. (1998) - "Assessment of Groundwater Vulnerability to Pollution Using the Drastic Method. Application to the Alqueva Area", *in "Innovation Issues in Irrigation and Drainage" (Ed.* L. Santos Pereira e John Gowing). London, Routledge, ICID-CIID, Water and the Environment.

LOBO-FERREIRA J.P. e OLIVEIRA, M.M., LEITÃO T.E., NOVO, M.E., MOINANTE, M. J., MOREIRA, P. e HENRIQUES, M.J. (1999a) - "Caracterização dos Recursos Hídricos Subterrâneos da Área Abrangida pelo Plano de Bacia Hidrográfica do Rio Tejo. Anexo Temático

10 - Qualidade dos Meios Hídricos. Tomo B - Qualidade das Águas Subterrâneas". Relatório Final da Fase 1. Março de 1999, 117 pp.

LOBO-FERREIRA J.P. e OLIVEIRA, M.M., LEITÃO T.E., NOVO, M.E., MOINANTE, M. J., MOREIRA, P. e HENRIQUES, M.J. (1999b) - "Avaliação da Qualidade das Águas Subterrâneas do Plano de Bacia do Tejo", *in "Sessão Pública de Apresentação e Exposição do Plano Nacional da Água e dos Planos de Bacia Hidrográfica"*, CCB, Lisboa, 9 de Abril, 1999.

LOBO-FERREIRA, J. P., MOINANTE, M. J., ZABEL, T., CLARK, L., BUCKLAND, J., FRANCE, S., VOGEL, W., GRATH, J., SCHWAIGER, K., KOREIMANN, C., GRAVESEN, P. e NIGGARD, E. (1996) - "Revised Version of the Final Report on the Evaluation of the Costs of Groundwater Inspection in the Member States". Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), WRc, AWW and DGU, July 1996.

LOBO-FERREIRA, J.P. (1993) - "Indicadores do Estado do Ambiente para Águas Subterrâneas". Lisboa, LNEC, Relatório 99/93 - GIAS, 63 pp.

LOBO-FERREIRA, J.P. e OLIVEIRA, M.M. (1993) - "Desenvolvimento de um Inventário das Águas Subterrâneas de Portugal - Caracterização dos Recursos Hídricos Subterrâneos e Mapeamento DRASTIC da Vulnerabilidade dos Aquíferos de Portugal". Relatório Final. Lisboa, LNEC, Relatório nº 179/93 - GIAS, 285 pp.

LOBO-FERREIRA, J.P., MOINANTE, M.J. e OLIVEIRA, M.M. (1994) - "Caracterização Geral, com Incidência no Meio Subterrâneo, da Faixa Litoral de Portugal Continental. 2º Relatório de Progresso". Lisboa, LNEC, Relatório 332/94 - GIAS, 107 pp.

LOBO-FERREIRA, J.P., RIBEIRO, L. e ALMEIDA, C.A. (1995) - "Requirements for Density, Sampling Frequency, Data Storage and Estimate Costs of Groundwater Quantity Monitoring". Final Report of the Project MW3 - Task 9d. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, CVRM/IST, FCUL, INAG, European Topic Centre on Inland Waters under Contract to the European Environment Agency.

RIBEIRO, L. (1989) - "Optimal Piezometric Network Design using Correspondence Analysis". Mathematical Methods in Geology, Proc., Vol. II, pp. 668-676, Pribam, Checoslovaquia.

RIBEIRO, L. (1992) - "Geoestatistical Characterization of Groundwater Systems". Lisboa, Instituto Superior Técnico, Ph.D. thesis, pp. 415.

RIBEIRO, L. (1993) - "A Geoestatistical-Deterministical Methodology for Evaluating Predictive Uncertainty of Saltwater Intrusion from Leakage". International Conference on Groundwater Quality Management - GQM 93, Tallin, Estonia, IAHS Publication nº 220, pp. 271-280.

RIBEIRO, L. (1995) - "Application of Multivariate Statistics, Trends- and Cluster analysis to groundwater Quality in Tejo and Sado aquifer" (co-author). International Conference on Groundwater Quality: Remediation and Protection - GQ95, Prague, IAHS Publication nº225, pp. 39-47.

RIBEIRO, L., ALMEIDA, C.A. e LOBO-FERREIRA, J.P. (1995b) - "Identify Gaps in Current National and International Monitoring Networks - Groundwater Quantity". Final Report of the Project MW3 - Task 8d. Lisboa, CVRM/IST, FCUL, LNEC, INAG, European Topic Centre on Inland Waters under Contract to the European Environment Agency.

RIBEIRO, L., ALMEIDA, C.A. e LOBO-FERREIRA, J.P. (1995c) - "Design of a Fresh Water Monitoring Network for the EEA - Groundwater Quantity". Final Report of the Project MW3 - Task 10d. Lisboa, CVRM/IST, FCUL, LNEC, INAG, European Topic Centre on Inland Waters under Contract to the European Environment Agency.

RIBEIRO, L., ALMEIDA, C.A. e LOBO-FERREIRA, J.P. (1995a) - "Evaluate Representativeness of Existing Monitoring Networks - Groundwater Quantity". Final Report of the Project MW3 - Task 7d. Lisboa, CVRM/IST, FCUL, LNEC, INAG, European Topic Centre on Inland Waters under Contract to the European Environment Agency.

RUBIN, Y., LOBO-FERREIRA, J.P., DELGADO RODRIGUES, J. e DAGAN, G (1990) - "Estimation of the hydraulic parameters of the Rio Maior aquifer in Portugal by using stochastic inverse modeling". Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Memória nº 752, 1990. Artigo publicado no Journal of Hydrology, 118 (1990), pp. 257-279.

VARELA, M. (1992) - "Groundwater Monitoring Schemes in Spain, in Preparation of a network on monitoring. EC groundwater action plan. Coordinated groundwater monitoring". Final Report co-ordinated by J. Ganoulis, Institut Europeen de L'Eau, Brussels, Set. 1992.

VRBA, J. (1991) - "Hydrogeological Aspects of Ground-Water Protection and Pollution, in Criteria and Approaches to Water Quality Management in Developing Countries". New York, United Nations, Department of Technical Co-operation for Development, Natural Resources Water Series N.º 26, 1991.

CAPÍTULO QUARTO - PROTECÇÃO E REABILITAÇÃO DE AQUÍFEROS

ANDERSON, W.C. e DEE, P.E. (1994) - "Innovative Site Remediation Technology. Chemical Treatment". Berlim, Springer-Verlag, 1994, 195 pp.

APPELO, C.A.J. e POSTMA, D. (1993) - "Geochemistry, Groundwater and Pollution". Holanda, A.A. Balkema Publishers, 1993, 536 pp.

BARBEE, G.C. (1994) - "Fate of Chlorinated Aliphatic Hydrocarbons in the Vadose Zone and Ground Water". Ground Water Monitoring Review, Inverno de 1994, pp. 129-140.

BICUDO, J.R., ALEGRE, H., ALBUQUERQUE, A., DAVID, L. e BARTOLOMEU, F. (1993) - "Inquérito Efectuado pelas Administrações Regionais de Saúde para Caracterização dos Sistemas de Abastecimento de Água - Síntese de Resultados". Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil e Direcção-Geral do Ambiente.

BLOWES, D.W., PTACEK, C.J., BENNER, S.G., McRAE, C.W.T. e PULS, R.W. (1998) - "Treatment of Dissolved Metals using Permeable Reactive Barriers, in "Groundwater Quality: Remediation and Protection", Proceedings of the GQ'98 Conference, Tübingen, Alemanha, IAHS Pub. N.º 250, pp. 483-490.

CANTER, L.W. e KNOX, R.C. (1985) - "Ground Water Pollution Control". Michigan, Lewis Publishers, Inc., 1985, 526 pp.

CIABATTI, P. e LOBO-FERREIRA, J.P. (1994) - "Desenvolvimento de um Inventário das Águas Subterrâneas de Portugal. Análise da Legislação sobre Zonamento de Protecção de Captações de Água Subterrânea. Aplicação a Dois Casos de Estudo Portugueses". Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Relatório 247/94 - GIAS, 1994.

CRINE, M. (1993) - "Le Traitement des Eaux Industrielles Chargées en Métaux Lourds. Situation Actuelle et Perspectives de Développment". Tribune de L'eau, nº 561/1, 1993, pp. 3-19.

CUSTODIO, E. e LLAMAS, M.R. (1976) - "Hidrología Subterránea". 1ª Edição, Barcelona, Ediciones Omega, S.A., 1976, 1157 pp.

EPA (1991) - "Delineation of Weelhead Protection Areas in Fractured Rocks". EPA 570/9-91-009. Groundwater Protection Division, Office of Grounwater and Drinking Water , U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC.

EPA (1993a) - "Guidelines for Delineation of Wellhead Protection Areas". EPA 440/5-93-001 (reprinted from 1987). Office of Water, Office of Grounwater Protection, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC.

EPA (1993b) - "Wellhead Protection: A Guide for Small Communities". Washington, DC, Seminar Publications, Environment Protection Agency/625/R-93/002.

FREDRICKSON, J.K., BOLTON, Jr. H. e BROCKMAN, F.J. (1993) - "*In Situ* and *On-Site* Bioreclamation". Environmental Science and Technology, Vol. 27, nº 9, pp. 1711-1716.

GRATHWOHL, P. (1998) - "Slow Contaminant Release: the Necessity for Enhanced/Natural Atenuation", *in* "*Groundwater Quality: Remediation and Protection*", Proceedings of the GQ'98 Conference, Tübingen, Alemanha, IAHS Pub. N.º 250, pp. 265-272.

JOHNSON, R.L., JOHNSON, P.C., McWHORTER, D.B., HINCHEE, R.E. e GOODMAN, I. (1993) - "An Overview of In Situ Air Sparging". Ground Water Monitoring Review, Outono de 1993, pp. 127-135.

KIRKPATRICK, S.W. e MCKEE, C.D., Inc. (1993) - "Removal, Remediation and Renovation at Industrial Facilities". Proposta de projecto, Lisboa, 1993, 289 pp.

LEE, M.D. e SWINDOLL, C.M. (1993) - "Bioventing for In Situ Remediation". Hydrological Sciences Journal, Vol. 38, nº 4, pp. 273-282.

LEE, M.D., THOMAS, J.M., BORDEN, R.C., BEDIENT, P.B., WARD, C.H. e WILSON, J.T. (1988) - "Biorestoration of Aquifers Contaminated with Organic Compounds". CRC Critical Reviews in Environmental Control, Vol. 18, nº 1, pp. 29-89.

LEITÃO, T.E. (1997) - "Metodologias para a Reabilitação de Aquíferos Poluídos". Tese de Doutoramento apresentada à Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, publicada nas Teses e Programas de Investigação do LNEC, TPI 11, ISBN 972-49-1733-9, Lisboa, 1997, 493 pp.

LEITÃO, T.E. e LOBO-FERREIRA, J.P. (1996) - "Protecção e Reabilitação de Aquíferos". Conferência "Recursos Hídricos e seu Aproveitamento: Por uma Política de Qualidade na Origem", Castelo Branco, Outubro de 1996, 24 pp.

LOBO-FERREIRA, J.P. (1983) - "Introdução à Contaminação de Águas Subterrâneas", *in* Seminário sobre "*O Abastecimento de Água e a Evacuação de Excreta em Zonas Rurais e Pequenas*

Comunidades". Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1982. Informação Técnica de Hidráulica nº 2, Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1983.

LOBO-FERREIRA, J.P. e CIABATTI, P.C. (1996) - "Recomendações para a Protecção e Gestão Integrada de Captações de Águas Subterrâneas em Portugal". Comunicação Convidada ao 3º Congresso da Água, organizado pela Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, em Lisboa, de 25 a 29 de Março de 1996.

LOBO-FERREIRA, J.P. e OLIVEIRA, M.M. (1993) - "Desenvolvimento de um Inventário da Águas Subterrâneas de Portugal. Caracterização dos Recursos Hídricos Subterrâneos e Mapeamento DRASTIC da Vulnerabilidade dos Aquíferos de Portugal". Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Relatório 179/93 - GIAS.

MACDONALD, J.A. e KAVANAUGH, M.C. (1994) - "Restoring Contaminated Groundwater: An Achievable Goal?" Environmental Science and Technology. Vol. 28, nº 8, 362A-368A.

MACDONALD, J.A. e RITTMANN, B.E. (1993) - "Performance Standards for In Situ Bioremediation". Environmental Science and Technology, Vol. 27, nº 10, pp. 1974-1979.

MONTEIRO, H., MADEIRA, C.P., MATOS, A.O. e BARTOLOMEU, F. (1998) - "Estudo e Caracterização das Condições de Protecção das Origens e Captações dos Sistemas de Abastecimento de Água (Origem Subterrânea)". Ministério da Saúde, Direcção Geral da Saúde, Divisão de Saúde Ambiental, Lisboa. Janeiro de 1998.

NP 836 (1971) - "Abastecimento de Água a Aglomerados Populacionais – Origem e Captação de Água". Norma Portuguesa Definitiva, Port. Nº 81/71 de 11/2/71.

SABATINI, D., KNOX, R. e HARWELL, J. (1998) - "Surfactante Selection for Enhanced Contaminant Extraction", *in "Groundwater Quality: Remediation and Protection"*, Proceedings of the GQ'98 Conference, Tübingen, Alemanha, IAHS Pub. N.º 250, pp. 361-366.

STAPS, J.J.M. (1991) - "International Evaluation of In Situ Biorestoration of Contaminated Soil and Groundwater", *in "Demonstration of Remedial Action Technologies for Contaminated Land and Groundwater"*, Ed. F. Olfenbuttel, Vol. 2, Parte 2, NATO/CCMS, Report n° EPA/600/R-93/012c, Bruxelas, pp. 741-766.

WDEQ (1997) - "Wyoming's Wellhead Protection (WHP) Program: Guidance Document". Wyoming Department of Environmental Quality Water Quality Division, Groundwater Protection Section, Cheyenne.

WILSON, J.T., LEACH, L.E., HENSON, M. e JONES, J.N. (1986) - "*In Situ* Biorestoration as a Ground Water Remediation Technique". Ground Water Monitoring Review, Outono de 1986, pp. 56-64.

CAPÍTULO QUINTO - GESTÃO OPTIMIZADA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. UMA ANÁLISE DA LITERATURA INTERNACIONAL

AGUADO, E. e REMSON, I. (1974) - "Groundwater hydraulics in aquifer management", *J. Hydraul. Div. ASCE, 100(HY1), p 103-118.*

AGUADO, E. e REMSON, I. (1980) - "Groundwater Management with Fixed Charges", *J. of Water Resources Planning and Management, Proceedings of ASCE Vol 106, No WR2, p 375-382.*

AGUADO, E., REMSON, I., PIKUL, M.F. e THOMAS, W.A. (1974) - "Optimal pumping for aquifer dewatering", *J. Hydraul. Div. ASCE, 100(HY7), p 860-877.*

AHLFELD, D.P. (1990) - "Two-stage Groundwater Remediation Design", *Journal of Water Resources Planning and Management Vol. 116, No. 4.*

AHLFELD, D.P. e HEIDARI, M. (1990) - "Applications of optimal hydraulic control to groundwater systems", *J. Water-Resour. Plann. Manage. vol. 120, no. 3, pp. 350-365.*

AHLFELD, D.P., J.M. MULVEY, PINDER, GF. e WOOD, E.F. (1988) - "Contaminated groundwater remediation design using simulaion, optimization and sensitivity theory 2, Analysis of a field site", *Water Resources Research Vol. 24, No. 3, p 443-452.*

AHLFELD, D.P., MULVEY, J.M., PINDER, G.F. e WOOD, E.F. (1986) - "Designing optimal strategies for contaminated GW remediation", *Adv. Water Resour., vol. 9, No. 2, p 77-84.*

AHLFELD, D.P., MULVEY, J.M., PINDER, G.F. e WOOD, E.F. (1998) - "Contaminated groundwater remediation design using simulation, optimization and sensitivity theory 1, Model development", *Water Resources Research Vol. 24, No. 3, p 431-442.*

AHLFELD, D.P., PAGE, R.H. e PINDER, G.F. (1995) - "Optimal groundwater remediation methods applied to a superfund site: From formulation to implementation", *Groundwater vol. 33, no. 1.*

ALLEY, W.M. (1986) - "Regression approximations for transport model constraint sets in combined aquifer simulation - optimization studies", *Water Resources Research Vol. 22, No. 4, p 581-586.*

ALLEY, W.M., AGUADO, E. e REMSON, I. (1976) - "Aquifer Management under Transient and Steady-State Conditions", *Water Resources Bulletin Vol. 12, No. 5, p 963-972.*

ANDRICEVIC, R. e KITANIDIS, P.K. (1990) - "Optimization of the Pumping Schedule in Aquifer Remediation Under Uncertainty", *Water Resources Research Vol. 26, No. 5.*

ARAL, M.M. (1990) - "Waste stabilization in multilayer aquifers by optimal hydraulic control", *Groundwater, vol. 27, No. 4, p 517-523.*

ATWOOD, D.F. e GORELICK, S.M. (1985) - "Hydraulic gradient control for groundwater contaminant removal", *Journal of Hydrology, 76, p 85-106.*

AVRIEL, M. (1976) - "Nonlinear programming: analysis and method". Prentice-hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J.

BARLOW, P.M., WAGNER, B.J. e BELITZ, K., (1996) - "Pumping strategies for management of a shallow water table: The value of the simulation-optimization approach", *Groundwater vol. 34, no. 2, pp. 305-317.*

BEAR, J. (1979) - "Hydraulics of groundwater". Mc Graw-hill Book Co. Inc., New York, N. Y.

BEAR, J. e LEVIN, O. (1967) - "The optimal yield of an aquifer", *Intern. Assoc. Sci. Hydr. Bull., Pubb. 72, Haifa, Isdrael.*

BELLMAN, R.E. (1957) - "Dynamic programming". Princeton University Press, Princeton NJ.

BELLMAN, R.E. (1960) - "Introduction to matrix analysis". Mc Graw-hill Book Co. Inc., New York, N.Y.

BELLMAN, R.E. e KALABA, R.E. (1965) - "Quasilinearization and non-linear boundary-value problems". Elsevier, NewYork.

BREDEHOEFT, J.D. e YOUNG, R.A. (1983) - "Conjunctive use of groundwater and surface water for irrigated agriculture: risk aversion". *Water Resources Research Vol. 19, No. 3.*

BREDEHOEFT, J.D.; e R.A. YOUNG (1970) - "The temporal allocation of groundwater: a simulation approach". *Water Resources Research Vol. 6, No. 1, p 3-21.*

CASOLA, W., H.R. NARAYAN, DUFFY, C. e BISHOP, B. (1986) - "Optimal control model for groundwater management". *J. of Water Res. Plann. and Man. Vol. 112, No. 2.*

CHAU, T.S. (1988) - "Analysis of Sustained Groundwater Withdrawals by the Combined Simulation-Optimization Approach". *Groundwater Vol. 26, No. 4, p 454-463.*

COLARULLO, S.J., HEIDARI, M. e MADDOCK, T. III (1984) - "Identification of an Optimal Groundwater Management Strategy in a Contaminated Aquifer". *Water Resources Bulletin Vol. 20, No. 5.*

CULVER, T.B. e SHOEMAKER, C.A. (1992) - "Dynamic optimal control for groundwater remediation with flexible management periods". *Water Resources Research, Vol. 28, No. 3, p 629-641.*

CUNHA M.C. e ANTUNES, A. J P. (1997) - "On the Efficient Location of Pumping Facilities in an Aquifer System". International Transactions of Operational Research, Vol.4, B13, pp 175-184.

CUNHA, M.C. (1990) - "Un Modèle d'Optimisation pour la Gestion des Ressources en Eau. Le Cas d'un Systeme Hydriques à Composante Souterraine et Composante Superficielle". Tese de Doutoramento, Louvain-la-Neuve, 1990

CUNHA, M.C. (1992) - "Evolução dos Modelos de Gestão de Sistemas Hídricos Subterrâneos: A Vertente Relacionada com a Investigação Operacional". Comunicação ao 5º Congresso da Associação Portuguesa para o Desenvolvimento da Investigação Operacional IO 92, Évora.

CUNHA, M.C. (1994) - "Exploração optimizada de sistemas aquíferos". Actas do 6º Simpósio Luso-Brasileiro de Hidráulica e Recursos Hídricos, pp.43-54, Lisboa, Abril.

CUNHA, M.C. (1995) - "Localização óptima de Captações em Sistemas Aquíferos". Desenvolvimento Sustentável dos Recursos Hídricos, ABRH Publicações nº1 Vol 2, pp. 115- 120.

CUNHA, M.C. (1996) "- O Planeamento e a Gestão de Sistemas Aquíferos: Breve Síntese das Principais Linhas da Investigação Actual". Comunicação ao Seminário "Recursos Hídricos Subterrâneos em Portugal: Quantidade e Qualidade", LNEC - Janeiro.

CUNHA, M.C. (1997) - "Sobre a Utilização de Algoritmos de Pesquisa Aleatória na Gestão de Sistemas Aquíferos". Actas do 3' Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa, Vol 1, Comunicação 16, Maputo, Abril.

CUNHA, M.C. (1999) - "On Solving Aquifer Management Problems With Simulated Annealing Algorithms". Water Resources Management (aceite para publicação)

CUNHA, M.C. e ANTUNES, A. J. P (1994) - "Optimal Design of Water Supply Structures at Regional Level". Proc. of VIIIth IWRA World Congress on Water Resources, Vol 2 (T6-S 1), pp. 1. 1 - 1. 18, Cairo, Novembro.

CUNHA, M.C., HUBERT, P. e TYTECA, D. (1993) - "Optimal Management of a Groundwater System for Seasonally Varying Agricultural Production". Water Resources Research, Vol 29(7), pp. 2415-2426.

CUPETO, C. e LOPES, A. R. (1999) - "Plano Nacional de Monitorização de Águas Subterrâneas".

Comunicação na Sessão Pública de Apresentação e Exposição do Plano Nacional da Água e dos Planos de Bacia Hidrográfica, INAG, Lisboa 9 a 19 de Abril.

DANIEL, J.W e MOORE, R.E. (1970) - "Computation and theory in the ordinary differential equations". W.H. Freeman and Co., San Francisco.

DANSKIN, W.R. e GORELICK, S.M. (1985) - "Policy Evaluation Tool: Management of a Multiaquifer System Using Controlled Stream Recharge". *Water Resources Research Vol. 21, No. 11, p 1731-1747.*

DATTA, B. e PERALTA R.C. (1986) - "Optimal modification of regional potentiometric surface design for groundwater contaminant protection". *Trans. ASAE, vol. 29, No. 4, p 1611-1623.*

DOMENICO, P.A. (1972) - "Concepts and models in groundwater hydrology". Mc Graw-hill Book Co. Inc., New York, N. Y.

DOUGHERTY, D. E. e MARRYOTT, R. A. (1991) - "Optimal groundwater management, 1.Simulated annealing". *Water Resour. Res..*27(10), pp. 2493-2508.

DREIZEN, Y.C. e Y.Y. HAIMES (1979) - "A hierarchy of response functions for groundwater management". *Water Resources Research Vol. 13, No. 1, p 78-86.*

EHEART, J. W., MORGAN, D. R. e RANJITHAN, S. (1991) - "Methods for designing hydraulic aquifer remediation techniques", *in Proceedings, ASCE Water Resources Planning and Management Speciality Conference,* American Society of Civil Engineers, New York, pp. 852-858.

EJAZ, M.S. e PERALTA, R.C. (1995) - "Maximizing conjunctive use of surface and ground water under surface water quality constraints". *Adv. Water-Resour. 1995 Vol. 18, No. 2.*

EMCH, P. G. e YEH, W. W-G. (1998) - "Management model for a conjuntive use of coastal surface water and ground water". *Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 124, No. 3, p 129-139.*

FERREIRA DA SILVA, J. e HAIE, N. (1997) - "Modelos de simulação e de gestão de aquíferos sujeitos á contaminação salina - um projecto de investigação para a preservação da qualidade das águas subterrâneas". Apresentado ao seminário de águas Subterrâneas da Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Lisboa 10-12 de Dezembro.

FERREIRA DA SILVA, J. e HAIE, N. e VIEIRA, J. P. (1998) - "Modelos de gestão de sistemas de abastecimento de água com origem em aquíferos sujeitos à contaminação salina". VIII Encontro Nacional de Saneamento Básico, 27-30 Outubro, Barcelos, pp. 151-163.

FERREIRA DA SILVA, J. e HAIE, N. e VIEIRA; J. P. (1999) - "Custos instantâneos de "produção" de água potável. Enfoque nos sistemas com origens afectadas pela intrusão salina". Comunicação aceite para apresentação na VI SILUSBA Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa, Coimbra Maio de 1999.

FINNEY, B. A., SAMSUHADI e WILLIS, R. (1992) - "Quasi-Three-Dimensional Optimization Model of Jakarta Basin". *J. of Water Res. Plann. and Man., Vol. 118, No. 1, p 18-31, 1992*

FREEZE, R.A., MASSMANN, J., SMITH, L., SPERLING, T. e BRUCE, J. (1990) - "Hydrogeological decision analysis 1. A framework". *Groundwater vol. 28, no. 5, pp. 738-766.*

FUTAGAMI, T., TAMAI, N. e YATSUZUKA M. (1976) - "FEM coupled with LP for water pollution control". *J. Hydraulic. Div. ASCE, 102(HY7), p 881-897.*

GAILEY, R.M. e GORELICK, S.M. (1993) - "Design of Optimal, Reliable Plume Capture Schemes: Application to the Gloucester Landfill Groundwater Contamination Problem". *Groundwater, Vol. 31, No. 1.*

GELHAR, L.W. (1993) - "Stochastic subsurface hydrology". Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs NJ.

GEORGAKAKOS-A.P. e VLASTA, D.A. (1991) - "Stochastic control of groundwater systems". *Water Resources Research Vol. 27, No. 8, p 2077-2090.*

GORELICK, S.M. (1983) - "A Review of Distributed Parameter Groundwater Management Modeling Methods". *Water Resources Research Vol. 19, No. 2, p 305-319, April.*

GORELICK, S.M. e REMSON, I. (1982a) - "Optimal dynamic management of groundwater pollutant sources". *Water Resources Research Vol. 18, No. 1, p 71-76.*

GORELICK, S.M. e REMSON, I. (1982b) - "Optimal Location and Management of Waste Disposal Facilities Affecting Ground Water Quality". *Water Resources Bulletin Vol 18, No1, p43-51.*

GORELICK, S.M., VOSS, C.I., GILL, P.E., MURRAY, W. e SAUNDERS, M.A. (1984) - "Aquifer Reclamation Design: The Use of Contaminant Transport Simulation Combined With Nonlinear Programing". *Water Resources Research Vol. 20, No. 4, p 415-417.*

GREENWALD, R.M. GORELICK, S.M. (1989) - "Particle Travel Times of Contaminants Incorporated into a Planning Model for Groundwater Plume Capture". *Journal of Hydrology Vol. 107, No. 1-4.*

HAIMES, Y.Y. (1977) - "Hierarchical Analyses of Water Resources Systems, Modeling and Optimization of Large-Scale Systems", McGraw-Hill International Book Company, New York, N.Y., 486 p

HAIMES, Y.Y. e DREIZEN, Y.C. (1979) - "Management of groundwater and surface water via

decomposition". *Water Resources Research Vol. 13, No. 1, p 69-77,*
HALLAJI, K. e YAZICIGIL, H. (1996) - "Optimal management of a coastal aquifer in southern Turkey". *Journal of Water Res. Plann. and Man., Vol. 122, No. 4, p 233-244,*
HALL-W.A. e DRACUP, J.A. (1970) - "Water resources systems engineering". McGraw-Hill, Inc., New York, N.Y.
HANTUSH, M.S. (1959) - "Analysis of Data from Pumping Wells near a River". *J. Geophys. Res., vol. 64, No. 11, p 1921-1932.*
HANTUSH, M.S. e MARINO, M.A. (1989) - "Chance-Constrained Model for Management of Stream-Aquifer System", *J. of Water Resources Planning and Management Vol. 115, No. 3, p 259-277.*
HEIDARI, M. (1982) - "Application of linear system's theory and linear programming to groundwater management in Kansas". *Water Resources Bulletin Vol. 18, No. 6, p 69-77.*
HUANG, C., e MAYER, A. S. (1997) - "Pump-and-treat optimization using well locations and pumping rates as decision variables". *Water Resour. Res.* 33(5), pp. 1001-1012.
ILLANGASEKARE, T. e MOREL-SEYTOUX, H.J. (1982) - "Stream-aquifer influence coefficient as tools for simulation and management", *Water Resources Research Vol. 18, No. 1, p 168-176.*
JAVANDEL, I. e TSANG, C. F. (1986) - "Capture-Zone Type Curves: A Tool for Aquifer Cleanup". *Ground Water, Vol. 24, nº 5, pp. 616-625.*
JOHNSON, V.M., ROGERS, L.L. e DOWLA, F.U. (1992) - "Application of artificial neural network technology to the optimization of field-scale pump-and-treat remediation (abstract)", *Eos Trans. AGU*, Fall Meeting suppl., 73(43), pp. 234.
JONES, L., R. Willis e YEH, W.G. (1987) - "Optimal control of nonlinear groundwater hydraulics using differential dynamic programming", *Water Resources Research Vol. 23, No. 11, p 2097-2106.*
KESHARI, A.K. e DATTA, B. (1996) - "Integrated optimal management of groundwater pollution and withdrawal". *Groundwater vol. 34, no. 1, pp. 104-113,*
KNAPP, K.C. e FEINERMAN, E. (1985) - "Optimal Steady-State in Groundwater Management". *Water Resources Bulletin Vol. 21, No. 6, p 967-975.*
LALL, U. e SANTINI, M.D. (1989) - "Optimization Model for Unconfined Stratified Aquifer Systems". *Journal of Hydrology Vol. 111, No. 1-4, p 145-162.*
LARSON, S.P., MADDOCK III, T., PAPADOPULOS, S. (1977) - "Optimization techniques applied to groundwater development", *Mem. Int. Assoc. Hydrogeol., 13, E57-E67.*
LATIF, M. e JAMES, L.D. (1991) - "Conjunctive Water Use to Control Waterlogging and Salinization", *Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 117, No. 6, p 611-628.*
LEE, Y-M., e ELLIS, J.H. (1996) - "Comparison of algorithms for nonlinear integer optimization: application to monitoring network design". *J. of Envir. Engrg.*, 122(6), pp. 524-531.
LEE, S.I. e KITANIDIS, P.K. (1991) - "Optimal Estimation and Scheduling in Aquifer Remediation with Incomplete Information". *Water Resources Research, Vol. 27, No. 9.*
LEFKOFF, J.J. e GORELICK, S.M. (1986) - "Design and cost analysis of rapid aquifer restoration systems using flow simulation and quadratic programming". *Groundwater, vol. 24, No. 6.*
LEFKOFF, J.J. e GORELICK, S.M. (1990) - "Simulating physical processes and economic behavior in saline, irrigated agriculture: model development". *Water Resources Research Vol. 26, No. 7, p 1359-1369.*
LEITÃO, T.E. (1997) - "Metodologias para a Reabilitação de Aquíferos Poluídos". Tese de Doutoramento apresentada à Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, publicada nas Teses e Programas de Investigação do LNEC, TPI 11, ISBN 972-49-1733-9, Lisboa, 1997, 493 pp.
LOACIGA, H.A. e MARINO, M.A. (1987) - "Parameter estimation in groundwater: classical, Bayesian and deterministic assumptions and their impact on management policies". *Water Resources Research v. 23, p 1027 - 1035.*
LOBO-FERREIRA, J.P. (1986) - "A Dispersão de Poluentes em Águas Subterrâneas. Análise Custo-Eficácia de Modelos Matemáticos e Ensaios de Traçadores para a Realização de Estudos de Impacto Ambiental". Tese para Especialista do LNEC, Lisboa, LNEC.
LOBO-FERREIRA, J.P. e CIABATTI, P. (1996) - "Recomendações para a Protecção e Gestão Integrada de Captações de Águas Subterrâneas em Portugal". Comunicação Convidada ao 3º Congresso da Água, organizado pela Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, em Lisboa, de 25 a 29 de Março de 1996.
LOBO-FERREIRA, J.P. e CIABATTI, P. (1997) - "Assessment of Legislation Concerning Geographical Zoning for Groundwater Protection. Application to a Portuguese Case-study". Conferência sobre "Operational Water Management", organizada pela Associação Europeia dos Recursos Hídricos, em Copenhague, Setembro, 8 pp.
MACK, L. (1985) - "Groundwater management by design". *Hydrol. Sci. Technol., 1, p 56-61.*
MADDOCK, T. III (1974b) - "The operation of stream-aquifer system under stochastic demands". *Water*

Resources Research Vol. 10, No. 1, p 1-10.

MADDOCK, T. III (1972) - "Algebraic Technological Function from a Simulation Model". *Water Resources Research, Vol 8, No 1, P 129-134.*

MADDOCK, T. III (1974a) - "Nonlinear technological functions for aquifers whose transmissivities vary with drawdown". *Water Resources Research Vol. 10, No. 4, p 877-881.*

MADDOCK, T. III e Y.Y. HAIMES (1975) - "A tax system for groundwater management". *Water Resources Research Vol. 11, No. 1, p 7-14.*

MAKINDE-ODUSOLA, B.A. e MARINO, M.A. (1989) - "Optimal Control of Groundwater by the Feedback Method of Control", *Water Resources Research Vol. 25, No. 6, p 1341-1352.*

MANGASARIAN, O.L. (1969) - "Nonlinear programming". Mc Graw-hill Book Co. Inc., New York, N.Y.

MARRYOTT, R. A., DOUGHERTY, D. E. e STOLLAR R. L. (1993) - "Optimal groundwater management, 2, Application of simulated annealing to a field-scale contaminated site". *Water Resour. Res.*.29(4), pp. 847-860.

MCKINNEY, D. C. e LIN, M. D. (1993) - "Groundwater optimization using genetic algorithms". Paper presented at *Siam Conference on Computational Issues in the Geosciences, Soc. for Ind. and Appl. Math.*, Houston, Tex., April 19-21.

MCKINNEY, D. C. e LIN, M. D. (1995) - "Approximate mixed-integer nonlinear programming methods for optimal aquifer remediation design". *Water Resour. Res.* 31(3), pp. 731-740.

MCKINNEY, D. C. e LIN, M. D. (1996) - "Pump-and-treat ground-water remediation system optimization". *J. of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 122(2), pp. 128-136.

MCKINNEY, D. C. e LIN, M. D., (1994) - "Genetic algorithm solution of groundwater management models". *Water Resour. Res.* 30(6), pp. 1897-1906.

MCKINNEY, D. C., e LIN, M. D. (1992) - "Genetic algorithms in groundwater flow optimization (abstract)". *Eos Trans. AGU.* Fall Meeting suppl., 73(43), pp. 229.

MEYER, P.D., VALOCCHI, A.J. e EHEART, J.W. (1994) - "Monitoring network design to provide initial detection of groundwater contamination". *Water Resour. Res.* 30(6), pp. 1897-1906.

MIGLIARI, E. e LOBO-FERREIRA, J. P. (1997) - "Groundwater Optimal Management. A Literature Review and an Application to Palmela Water Supply System". Lisboa, LNEC, Relatório 215/97 - GIAS, 105 pp.

MISIRLI, F. e YAZICIGIL, H. (1997) - "Optimal groundwater pollution plume containment with fixed charges"., *J. of Water Res. Plann. and Man. Vol. 123, No. 1, p 2-14.*

MOREL-SEYTOUX, H.J. e DALY, C.J. (1975) - "A discrete kernel generator for stream-aquifer studies". *Water Resources Research Vol. 11, No. 2, p 253-260.*

MORGAN, D.R., WAYLAND EHEART, J. e VALOCCHI, A.J. (1993) - "Aquifer remediation design under uncertainty using a new chance constrained programming technique". *Water Resources Research Vol. 29, No. 3, p 551-561.*

PECK, A.S., GORELICK, S.M., DE MARSILY, G., FOSTER-S. e KOVALEVSKY, V. (1988) - "Consequences of spatial variability in aquifer properties and data delimitations for groundwater modeling practice, *Intern. Assoc. Sci. Hydrology. Publ. No. 175.*

PERALTA, R.C., AZARMNIA, H. e TAKAHASHI, S. (1991a) - "Embedding and response matrix techniques for maximizing steady-state groundwater extraction: computational comparison". *Groundwater vol. 29, no. 3, pp. 357-364.*

PERALTA, R.C. e KOWALSKI, K.G. (1986) - "Optimizing the Rapid Evolution of Target Groundwater Potentiometric Surfaces". *Transactions of the ASAE Vol. 29, No. 4, p 940-947.*

PERALTA, R.C. e WARD, R. (1991) - "Short-term plume containment: multiobjective comparison". *Groundwater, vol. 29, No. 4.*

PERALTA, R.C., ASGHARI, K. e SHULSTAD, R. (1991b) - "SECTAR for Economically Optimal Sustained Groundwater Yield Planning". *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 117, No. 1, p 5-24.*

PERALTA, R.C., CANTILLER, R.R.A. e TERRY, J.E. (1995a) - "Optimal large-scale conjunctive water-use planning: Case study". *J. Water-Resour. Plann. Manage. vol. 121, no. 6, pp. 471-478.*

PERALTA, R.C., SOLAIMANIAN, J. e MUSHARRAFICH, G.R. (1995b) - "Optimal dispersed groundwater contaminant management: MODCON method, *J. Water-Resour. Plann. Manage. vol. 121, no. 6, pp. 490-498.*

RANJITHAN, S., EHEART, J. W. e GARRETT Jr., J. H. (1993) - "Neural network-based screening for groundwater reclamation under uncertainty". *Water Resour. Res.* 29(3), pp. 563-574.

REICHARD, E.G. (1995) - "Groundwater-surface water management with stochastic surface water supplies: A simulation optimization approach". *Water-Resour. Res., Vol. 31, No. 11.*

RITZEL, B.J. e EHEART, J. W. (1994) - "Using genetic algorithms to solve a multiple objective groundwater pollution containment problem". *Water Resour. Resear.* 30(9), pp. 2647-2659.

RIZZO, D. M. e DOUGHERTY, D. E. (1992) - "Characterization of porous media using hard and soft information", *in* T. Russell *et al.* (ed.), *Numerical Methods in Water Resources*, Elsevier Applied Science, New York, pp. 449-455.

ROGERS, L. L. e DOWLA, F. U. (1992) - "Groundwater remediation optimization with artificial neural networks and the genetic algorithm (abstract)". *Eos Trans. AGU*, Fall Meeting suppl., 73(43), pp. 186.

ROGERS, L. L. e DOWLA, F. U. (1994) - "Optimization of groundwater remediation using artificial neural networks with parallel solute transport modeling". *Water Resour. Res.* 30(2), 457-481.

RUBIN, Y., LOBO-FERREIRA, J.P., DELGADO RODRIGUES, J. e DAGAN, G (1990) - "Estimation of the hydraulic parameters of the Rio Maior aquifer in Portugal by using stochastic inverse modeling". Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Memória nº 752, 1990. Artigo publicado no Journal of Hydrology, 118 (1990), pp. 257-279.

SAWYER. C.S. e AHLFELD, D.A. (1995) - "Groundwater remediation design using a three-dimensional simulation model and mixed-integer programming". *Water Resour. Res.* 31(5), pp. 1373-1385.

SCHWARZ, J. (1976) - "Linear Models for Groundwater Management". *Journal of Hydrology Vol. 28, No. 2/4, p 377-392.*

SHAMIR, U., BEAR, J. e GAMLIEL, A. (1984) - "Optimal Annual Operation of a Coastal Aquifer". *Water Resources Research Vol. 20, No. 4, p 435-444.*

TABAK, D. e KUO, B.C. (1971) - "Optimal control by mathematical programming". Prentice-hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J.

TAKAHASHI, S. e PERALTA, R.C. (1995) - "Optimal perennial yield planning for complex nonlinear aquifers: Methods and examples". *Adv. Water-Resour. Vol. 18, No. 1, p 49-62.*

TAYLOR, O.J. (1970) - "Optimization of conjunctive use of water in a stream-aquifer system using linear programming". *U. S. Geol. Survey Prof. Pap. 700C*, C218-C221.

TIEDEMAN, C. e GORELICK, S.M. (1993) - "Analysis of Uncertainty in Optimal Groundwater Contaminant Capture Design". *Water Resources Research, Vol. 29, No. 7.*

TUNG, Y.K. e KOLTERMANN, C.E., (1985) - "Some Computational Experiences Using Embedding Technique for Groundwater Management". *Groundwater Vol. 23, No. 4, p 455-464.*

TUNG, Y.K., (1986) - "Groundwater management by chance-constrained model". *J. of Water Resources Planning and Management Vol. 112, No. 1 p 1-19.*

VARGA, R.S. (1962) - "Matrix iterative analysis". Prentice-hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J.

VARLJEN, M.D. e SHAFER, J.M. (1993) - "Coupled simulation-optimization modeling for municipal groundwater supply protection". *Groundwater vol. 31, no. 3, pp. 401-409.*

WAGNER, B.J. e GORELICK, S.M. (1987) - "Optimal Groundwater Quality Management Under Parameter Uncertainty". *Water Resources Research Vol. 23, No. 7, p 1162-1174.*

WAGNER, B.J. e GORELICK, S.M. (1989) - "Reliable Aquifer Remediation in the Presence of Spatially Variable Hydraulic Conductivity: From Data to Design". *Water Resources Research Vol. 25, No. 10.*

WAGNER, J.M., SHAMIR, U. e NEMATI, H.R. (1992) - "Groundwater Quality Management under Uncertainty: Stochastic Programming Approaches and the Value of Information, *Water Resources Research Vol. 28, No. 5.*

WANAKULE, N. e MAYS, L.W. (1986) - "Optimal Management of Large-Scale Aquifers: Methodology and Applications". *Water Res. Res. Vol. 22, No. 4, p 447-465.*

WILLIS, R. (1976) - "Optimal groundwater quality management: well injection of waste waters". *Water Resources Research, vol. 12, no 1, p 47-53.*

WILLIS, R. (1983) - "A unified approach to regional groundwater management", *in Groundwater Hydraulics, Water Resour. Monogr. Ser., Washington.*

WILLIS, R. e FINNEY, B.A. (1985) - "Optimal Control of Nonlinear Groundwater Hydraulics: Theoretical Development and Numerical Experiments". *Water Resources Research Vol. 21, No. 10, p 1476-1482,*

WILLIS, R. e FINNEY, B.A. (1988) - "Planning Model for Optimal Control of Saltwater Intrusion". *J. of Water Resources Planning and Management Vol. 114, No. 2, p 163-178.*

WILLIS, R. e NEWMAN, B.A. (1977) - "Management Model for Ground Water Development". *Journal of the Water Resources Planning and Management Division, Vol. 103, No. WR1, Proceedings paper No. 12953, p 159-171.*

WILLIS, R. e YEH, W.W. G. (1987) - "Groundwater Systems Planning and Management". Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs NJ.. 416 pp.

WILLIS-R. (1979) - "A planning model for the management of groundwater quality". *Water Resources Research Vol. 15, No. 6, p 1305-1312.*

WU, N. e COPPINS, R. (1981) - "Linear programming and extensions". Mc Graw-hill Book Co. Inc.,

New York, N. Y.
YAZDANIAN, A. e PERALTA, R.C. (1986) - "Sustained-yield groundwater planning by goal programming". *Groundwater Vol. 24 No. 2 p 157-165.*
YAZICIGIL, H. e RASHEEDUDDIN, M., (1987) - "Optimization Model for Groundwater Management in Multi-Aquifer Systems". *J. of Water Resources Planning and Management Vol. 113, No. 2, p 257-273.*
YOON, J-H. e SHOEMAKER. C.A. (1999) - "Comparison of optimization methods for ground-water bioremediation". *J. of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 125(1), pp. 54-63.
YOUNG, R.A. e BREDEHOEFT, J.D. (1972) - "Digital computer simulation for solving management problems of conjunctive groundwater and surface water systems". *Water Resources Research Vol. 8, No. 3, p 533-556.*
YU, W. e HAIMES, Y.Y. (1974) - "Multilevel optimization for conjunctive use of groundwater and surface water". *Water Resources Research Vol. 10, No. 4, p 625-636.*

CAPÍTULO SEXTO - A INVESTIGAÇÃO RECENTE SOBRE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM PORTUGAL

Apresentam-se os autores e os títulos das comunicações do "Seminário sobre ÁGUAS SUBTERRÂNEAS", organizado pela Associação Portuguesa dos Recursos (APRH) em Dezembro de 1997, e/ou ao 4º Congresso da Água da APRH no Tema 5 ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, organizado pela APRH, em Março de 1998. Estas comunicações estão disponíveis em CD-ROM. Mantiveram-se os nomes apresentados pelos autores nas suas Comunicações:

Alberto Pais QUINA e José Rocha NEVES - Aterros sanitários e recursos hídricos. Um caso prático. Publicação em CD-ROM, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Março de 1998.

Alberto S. LIMA, Jorge V. PAMPLONA, Carlos S. ALVES, Manuel O. SILVA - Ocorrência discreta de águas férreas em Faião-Braga, NW de Portugal: Modelo Hidrogeológico Conceptual. Publicação em CD-ROM, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Março de 1998.

Alice FIALHO, António CHAMBEL, Jorge DUQUE - Sistema aquífero dos gnaisses de Évora. Publicação em CD-ROM, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Março de 1998.

Álvaro H. CARVALHO, Augusto M. COSTA - Sistema aquífero de Monforte - Alter do Chão. Uma das áreas de intervenção detalhada do IGM no projecto de estudo dos recursos hídricos. Publicação em CD-ROM, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Março de 1998.

Amélia de CARVALHO DILL, Imre MÜLLER, Augusto MARQUES DA COSTA, José Paulo MONTEIRO - Importância do uso de métodos geofísicos electromagnéticos Very Low Frequency Electromagnetics (VLF-EM) e Radio Magnetotelluric - Resistivity (RMT-R) no estudo de aquíferos cársicos do Alentejo e do Algarve. Publicação em CD-ROM, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Março de 1998.

Ana Cristina BUXO, Luís RIBEIRO - Aplicação de uma técnica mista de análise em componentes principais e variografia à classificação do comportamento de piezómetros. Publicação em CD-ROM, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Março de 1998.

Ana Rita LOPES, Maria Emília MACEDO, Marco ORLANDO, Carlos CUPETO - Monitorização da qualidade da água subterrânea em situações especiais. Publicação em CD-ROM, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Março de 1998.

António CHAMBEL, Jorge DUQUE - Estudo dos recursos hídricos subterrâneos do Alentejo (ERHSA) - Contribuição da Universidade de Évora. Publicação em CD-ROM, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Março de 1998.

Augusto Marques da COSTA - Sistema aquífero Moura-Ficalho. Publicação em CD-ROM, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Março de 1998.

Eduardo A. PARALTA - Caracterização hidrogeológica da bacia da ribeira da Chaminé (aquífero dos Gabros de Beja) resultados preliminares. Publicação em CD-ROM, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Março de 1998.

Francisco MIRA e António CHAMBEL, Jorge DUQUE - Caracterização hidroquímica das águas subterrâneas correspondentes à área da carta topográfica n.º 509 de Ferreira do Alentejo. Publicação em CD-ROM, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Março de 1998.

Herlander LIMA, António CHAMBEL, João ALVES e Pedro FRANSCISCO - Impacte da cultura de eucaliptos sobre recursos hídricos subterrâneos da serra de Ossa. Publicação em CD-ROM, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Março de 1998.

Irene Regina Ramos CANDEIAS e Mário Lourenço da SILVA - Avaliação dos recursos hídricos subterrâneos e caracterização hidráulica da formação. Publicação em CD-ROM, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Março de 1998.

J. MARTINS FERREIRA - Caracterização e gestão dos recursos hídricos subterrâneos em Portugal Continental. Publicação em CD-ROM, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Março de 1998.

J. MARTINS FERREIRA - Contribuição para o enquadramento jurídico da pesquisa e captação da água em Portugal. Publicação em CD-ROM, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Março de 1998.

J. P. Cárcomo LOBO FERREIRA - Vulnerabilidade à poluição de águas subterrâneas: Fundamentos e conceitos para uma melhor gestão e protecção dos aquíferos de Portugal. Publicação em CD-ROM, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Março de 1998.

João NASCIMENTO, António CHAMBEL, Jorge DUQUE - Caracterização hidroquímica das águas subterrâneas das rochas cristalinas do concelhos Sines e Santiago do Cacém - Nota prévia. Publicação em CD-ROM, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Março de 1998.

Jorge DUQUE e António CHAMBEL - Caracterização hidroquímica das águas subterrâneas do sector Oeste do concelho de Alter do Chão. Publicação em CD-ROM, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Março de 1998.

Jorge DUQUE e Carlos ALMEIDA - Caracterização hidroquímica do sistema aquífero dos Gabros de Beja

Jorge DUQUE e Carlos ALMEIDA - Modelação matemática do sistema aquífero dos Gabros de Beja. Publicação em CD-ROM, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Março de 1998.

Jorge Manuel LAVAREDAS e Manuel Oliveira da SILVA - Contribuição para o conhecimento hidrogeológico do sistema aquífero de Sines

José M. M. AZEVEDO e Martim R. PORTUGAL FERREIRA - Condições da ocorrência e funções hidrogeológicas das lagoas em pequenas ilhas vulcânicas: O exemplo da ilha das Flores - Açores. Publicação em CD-ROM, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Março de 1998.

José Paulo MONTEIRO e Mário Lourenço da SILVA - Modelação matemática de escoamentos em aquíferos cársicos. Discussão de objectivos e métodos baseados num caso de estudo. Publicação em CD-ROM, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Março de 1998.

José QUITÉRIO COSTA - Moralização na execução de furos de pesquisa e eventual captação de águas subterrâneas e métodos de perfuração utilizados na sua realização. Publicação em CD-ROM, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Março de 1998.

José V. CRUZ e Manuel O. SILVA - Estudo do efeito de maré em aquíferos costeiros: O caso de estudo da ilha do Pico (Açores - Portugal). Publicação em CD-ROM, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Março de 1998.

Lídia FLOR, Adelaide LOBO, Marco ROSA e Aida POUPINO - Estudo preliminar da microflora bacteriana de água subterrânea de algumas ilhas do Arquipélago dos Açores. Publicação em CD-ROM, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Março de 1998.

Luís Filipe Pires FERNANDES e Manuel de Oliveira da SILVA- Influência das actividades antrópicas na qualidade das águas subterrâneas. Casos de Trás-os-Montes Oriental (primeira abordagem). Publicação em CD-ROM, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Março de 1998.

Luis M. FERREIRA GOMES e Fernando ALBUQUERQUE - A utilização em multi-usos da água minero-termal do campo geotérmico de S. Pedro do Sul. Publicação em CD-ROM, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Março de 1998.

Luís RIBEIRO - Probabilidades e probabilidades condicionais em hidrogeologia. Publicação em CD-ROM, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Março de 1998.

Luís RIBEIRO, Ana C. SANTOS e Jorge DIAS da SILVA - Caracterização geoestatística da contaminação salina por dissolução de evaporitos - Um caso na zona da Maragota. Publicação em CD-ROM, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Março de 1998.

Luís RIBEIRO, Leopoldo CORTEZ, Fernando DURÃO e Ana R. LOPES - Modelos de representação global para caracterização de sistemas aquíferos cársicos. Publicação em CD-ROM, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Março de 1998.

Luís RIBEIRO, Leopoldo CORTEZ, Fernando DURÃO e Ana R. LOPES - Modelos de representação global para caracterização de sistemas aquíferos cársicos. Publicação em CD-ROM, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Março de 1998.

M. COSTA, A. C. DILL, I. MÜLLER e V. OLIVEIRA - Monitorização dos aquíferos da região de Moura-Ficalho - Sondagens, construção e equipamento de piezómetros. Publicação em CD-ROM, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Março de 1998.

M. J. F. MORAIS e J. SILAR - Interpretação preliminar de dados isotópicos de carbono em águas

minerais da região das Beiras. Publicação em CD-ROM, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Março de 1998.

M. T. CONDESSO DE MELO, M. A. MARQUES DA SILVA e W. M. EDMUNDS - Evolução hidrogeoquímica do sistema multiaquífero cretácico do Baixo Vouga - Aveiro. Publicação em CD-ROM, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Março de 1998.

Manuel M. PACHECO FIGUEIREDO, Luís RIBEIRO e José M. P. FERREIRA LEMOS - Modelação estocástica de escoamentos em aquíferos. Simulações de Monte-Carlo Condicionadas. Publicação em CD-ROM, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Março de 1998.

Manuel OLIVEIRA DA SILVA - Sistemas aquíferos de Estremoz - Cano e Elvas - Vila Boim - Estudos dos recursos hídricos subterrâneos do Alentejo. Publicação em CD-ROM, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Março de 1998.

Maria Carla LOURENÇO - Recursos geotérmicos de baixa entalpia em Portugal Continental. Publicação em CD-ROM, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Março de 1998.

Mário Vicente SILVA - Teledetecção na recarga dos aquíferos subterrâneos com águas de superfície. Publicação em CD-ROM, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Março de 1998.

Nelson Edgar Viegas RODRIGUES - Caracterização de maciços fracturados com traçadores. Publicação em CD-ROM, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Março de 1998.

Nuno ALTE da VEIGA - Delimitação das variações laterais num reservatório aluvionar com métodos eléctricos. Publicação em CD-ROM, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Março de 1998.

Patrícia AIRES, António CHAMBEL e Jorge DUQUE - Caracterização hidroquímica das águas subterrâneas das rochas cristalinas do concelho de Arraiolos - Nota prévia. Publicação em CD-ROM, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Março de 1998.

Paula GALEGO FERNANDES e Manuel Oliveira da SILVA - Contribuição para a caracterização hidrogeológica do sistema aquífero da bacia do Sado. Publicação em CD-ROM, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Março de 1998.

Paula M. M. CARREIRA, António M. M. SOARES, Manuel A. MARQUES DA SILVA, Luis ARAGUÁS-ARAGUÁS, Kazimier ROSANSKI e Martin STUTE - Caracterização paleoclimática do sistema multiaquífero cretácico de Aveiro através da aplicação de isótopos ambientais. Publicação em CD-ROM, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Março de 1998.

Paulo ANDRADE, António CHAMBEL e Jorge DUQUE - Caracterização hidroquímica das águas subterrâneas das rochas cristalinas do Concelho de Portalegre - Nota prévia. Publicação em CD-ROM, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Março de 1998.

Pedro PINA, Luís RIBEIRO e Fernando MUGE - A morfologia matemática na arquitectura dos sistemas hidrogeológicos. Publicação em CD-ROM, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Março de 1998.

R. ANDRADE AFONSO, R. M. D. GONÇALVES e L. A. MENDES VICTOR - A geofísica na detecção e parametrização de aquíferos - Algumas aplicações. Publicação em CD-ROM, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Março de 1998.

Raúl António SIMÕES DUARTE - Prospecção e captação de águas subterrâneas em terrenos vulcânicos - Arquipélago da Madeira. Publicação em CD-ROM, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Março de 1998.

Rui M. D. GONÇALVES e António R. ANDRADE AFONSO - A geofísica na protecção dos recursos hídricos. Mapeamento de zonas de risco do Vale do Tejo-Sado recorrendo a prospecção geoeléctrica. Publicação em CD-ROM, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Março de 1998.

Sandra CARVALHO, Carla MIDÕES, Pedro DUARTE, Marco ORLANDO, Raúl SIMÕES DUARTE, Alberto PAIS QUINA, Carlos CUPETO e Carlos ALMEIDA. Publicação em CD-ROM, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Março de 1998.

Sílvia GUERREIRO, António CHAMBEL e Jorge DUQUE - Caracterização hidroquímica das águas subterrâneas das rochas cristalinas dos concelhos de Montemor-o-Novo e Vendas Novas - Nota prévia. Publicação em CD-ROM, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Março de 1998.

Sofia B. A. BATISTA, Maria José A. P. A. CEREJEIRA, Ascensão TRANCOSO, Maria São Luís CENTENO e António Manuel S. SILVA FERNANDES - Pesticidas e nitratos em águas subterrâneas na região do Ribatejo e Oeste em 1996. Publicação em CD-ROM, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Março de 1998.

T. Y. STIGTER, V. E. A. POST, S. P. J. VAN OOIJEN, C. A. J. APPELO e A. M. M. DE CARVALHO DILL - The combined use of hydrogeological and hydrochemical data to explain the observed groundwater composition under irrigated land in the campina de Faro, Algarve. Publicação em CD-ROM, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Março de 1998.

Teresa Eira LEITÃO, Seán P. QUIGLEY e J. P. Cárcomo LOBO FERREIRA - Propagação de nitratos na zona vadosa do solo - Apresentação de um ensaio de traçados realizado no "aquífero artificial" do GIAS. Publicação em CD-ROM, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Março de 1998.

Teresa I. F. OLIVEIRA, Fernando T. ROCHA e Manuel A. MARQUES DA SILVA - Influência da troca catiónica no quimismo da água no aquífero de Aveiro. Publicação em CD-ROM, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Março de 1998.

Vasques CONDEÇA, António CHAMBEL e Jorge DUQUE - Caracterização hidroquímica das águas subterrâneas da área das corneanas anfibólicas de Valverde, Évora. Publicação em CD-ROM, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Março de 1998.

Vítor G. OLIVEIRA e Luís RIBEIRO - Influência da heterogeneidade na modelação da população de aquíferos em meios porosos - O caso de Vale de Milhaços. Publicação em CD-ROM, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Março de 1998.

CAPÍTULO SÉTIMO - OS DESAFIOS DA UNIÃO EUROPEIA QUANTO À INVESTIGAÇÃO E AO AMBIENTE NO DOMÍNIO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

GANOULIS, J., RINGELTAUBE, FRIED, J. SILVA COSTA, J., JEDLITSCHKA, LOBO FERREIRA, J.P. MARGAT, J., RUTGERS, VAN DEN AKKER e VARELA, M. (1992) - "Preparation of a Network on Monitoring. EC Groundwater Action Plan, Co-ordinated by J. Ganoulis". Distributed by DGXI as Annex 3 of the Draft Agenda for the meeting of Experts concerning a Groundwater Action Programme (GAP), held in Brussels, Dec. 1, 1993.

KARSTENS, P. (Ed.) (1999) - "Prospective terrestrial environment and groundwater pollution research conference". Proceedings of the European Science Foundation Gpoll Conference, realizada em Göteborg, 15-18 November 1998.

MELO BAPTISTA, J. e LOBO-FERREIRA, J.P. (Ed.) (1997) - "Task Force Environment Water. Portuguese Contribution". Lisboa, LNEC e JNICT, 95 pp.

REINIGER P. e LOBO-FERREIRA, J.P. (1992) - "Report of the Specific Session A: Science and Technology", in "*Memorandum on the Outcome of the European Workshop on RTD for Freshwater Resources Management in the Community*" por M. Mendes de Carvalho, no âmbito do Projecto Nº 6 "Research and Technological Development for the Supply and Use of Fresh Water Resources" do Programa SAST (Strategic Analysis in Science and Technology) da CE. Publicação EUR - 14730 - EN, Set. 1992.

CAPÍTULO OITAVO - AFIRMAÇÃO DO PAPEL INTERNACIONAL DA INVESTIGAÇÃO COMUNITÁRIA NO DOMÍNIO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

COSTA, W.D. e COSTA FILHO, W.D. (1995) - "Disponibilidade de Águas Subterrâneas no Semiárido do Nordeste do Brasil". *in Desenvolvimento Sustentável dos Recursos Hídricos*. ABRH, Publicações nº 1, Volume 2 - Águas Subterrâneas, Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Recife, Brasil.

LOBO-FERREIRA, J.P. (1994a) - "Quando é Preciso Transportar o Piano...". Lisboa, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Editorial do Presidente da Comissão Directiva da APRH no Boletim Informativo da APRH nº 81, Abril de 1994.

LOBO-FERREIRA, J.P. (1994b) - "Breve apreciação da participação portuguesa no VI SILUBESA". Lisboa, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Artigo do Coordenador-Geral para Portugal do VI Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental (VI SILUBESA), Presidente Cessante da Comissão Directiva da APRH, Boletim Informativo da APRH nº 83, Outubro de 1994.

LOBO-FERREIRA, J.P. e TILAK VIEGAS, F.J. (1999) - "S&T Co-operation with Asia in the Area of Sustainable Management of Natural Resources. A Co-ordination Meeting, China 1998. Beijing, P. R. China, Nov. 24-27, 1998. Draft Executive Summary". Bruxelas, DGXII, EBNIC Newsletters, Spring 1999, 12 pp.

TILAK VIEGAS, F.J. (1999) - "Proposal for a Regional Workshop on Policies for Land Use in Southern Africa in the context of the Liberalisation of Trade in Agricultural Products, African Food

Security and the Development of Eco-Tourism : Issues and Opportunities". Brussels, EC, DGXII-INCO-DC Programme co-ordination.

CAPÍTULO NONO - PLANO DE ESTUDOS SOBRE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Apenas se apresentam as referências bibliográficas específicas das propostas. As referências da síntese deste capítulo podem ser encontradas na bibliografia dos capítulos anteriores.

P1 e P1+P10-BRASIL:

COSTA, W.D. e COSTA FILHO, W.D. (1995) - "Disponibilidade de Águas Subterrâneas no Semiárido do Nordeste do Brasil". *in Desenvolvimento Sustentável dos Recursos Hídricos.* ABRH, Publicações nº 1, Volume 2 - Águas Subterrâneas, Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Recife, Brasil.

OLIVEIRA, M. M. e LOBO-FERREIRA (1994) - "Desenvolvimento de um Inventário das Águas Subterrâneas de Portugal: Metodologias de Análise da Recarga de Aquíferos". Lisboa, LNEC, Relatório 319/94 - GIAS.

OLIVEIRA, M. M., MOINANTE, M.J. e LOBO-FERREIRA, J. P. (1997a) - "Cartografia Automática da Vulnerabilidade de Aquíferos com Base na Aplicação do Método DRASTIC. Relatório Final". Lisboa, LNEC, Relatório 60/97 - GIAS, 535 pp.

P2:

ABOUKHALED, A., ALFARO, A. e SMITH, M. (1982) - "Lysimeters. Irrigation and Drainage Paper Nº 39". Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma, 68 pp.

BHARDWAJ, A. e SINGH, R. (1992) - "Development of a portable rainfall simulator infiltrometer for infiltration, runoff and erosion studies". Agricultural Water Management, (22), 235-248.

CORRADINI, C., MELONE, F. e SMITH, R.E. (1994) - "Modeling infiltration during complex rainfall sequences". Water Resources Research, 30 (10), 2777-2784.

EAGLESON, P.S. (1978) - "Climate, soil and vegetation. 5. A derived distribution of storm surface runoff". Water Resources Research, 14 (5), 741-748.

FREEZE, R.A. e CHERRY, J.A. (1979) - "Groundwater". Prentice-Hall, Inc. 604 pp.

KHAN, B.R., MAINUDDIN, M. e MOLLA, M.N. (1993) - "Design, construction and testing of a lysimeter for a study of evapotranspiration of different crops". Agricultural Water Management, (23), 183-197.

NARASIMHAN, T.N. (1989) - "Numerical simulation of Richards equation: Current approaches and an alternate perspective. Unsaturated Flow in Hydrologic Modeling - Theory and Practice". NATO ASI Series, C 275. Ed. Morel-Seytoux, 325-341.

PARKIN, G.W., KACHANOSKI, R.G., ELRICK, D.E. e GIBSON, R.G. (1995) - "Unsaturated hydraulic conductivity measured by time domain reflectometry under a rainfall simulator", Water Resources Research, 31 (3), 447-454.

RATHFELDER, K. e ABRIOLA, L.M. (1994) - "Mass conservative numerical solutions of the head-based Richards equation". Water Resources Research, 30 (9), 2579-2586.

SALEHZADEH, A. e DEMOND, A.H. (1994) - "Apparatus for the rapid automated measurement of unsaturated soil transport properties". Water Resources Research, 30 (10), 2679-2690.

TOPP, G.C. e DAVIS, J.L. (1985) - "Measurement of soil water content using time domain reflectometry (TDR): A field evaluation". Soil Sci. Soc. Am. J., 49, 19-24.

TOPP, G.C., DAVIS, J.L. e CHINNICK, J.H. (1983) - "Using TDR water content measurements for infiltration studies. Proceedings of National Conference on Advances in Infiltration", Chicago, IL. ASAE Publ. 11-83, 231-240.

P3 e P3-SADCC:

ALLER, L., BENNET, T., LEHR, J. H., PETTY, R. J. e HACKETT, G. (1987) - "DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings", EPA-600/2-87-035.

GONÇALVES, R. M. D. e ANDRADE AFONSO, A. R. (1998) - "A geofísica na protecção dos recursos

hídricos. Mapeamento de zonas de risco do Vale do Tejo-Sado recorrendo a prospecção geoeléctrica". Lisboa, 4º Congrsso da Água da APRH.

LOBO-FERREIRA J. P. (1998) - "Vulnerabilidade à poluição de águas subterrâneas: Fundamentos e conceitos para uma melhor gestão e protecção dos aquíferos de Portugal". Lisboa, 4º Congrsso da Água da APRH.

LOBO-FERREIRA, J.P., OLIVEIRA, M.M., LEITÃO, T.E., NOVO, M.E., MOINANTE, M.J., MOREIRA, P. e HENRIQUES, M. J. (1999a) - "Caracterização dos Recursos Hídricos Subterrâneos da Área Abrangida pelo Plano de Bacia Hidrográfica do Rio Tejo. Anexo Temático 10 - Qualidade dos Meios Hídricos. Tomo 10B - Qualidade das Águas Subterrâneas". Relatório Final da Fase 1. Março de 1999, 117 pp.

NAVALUR, K.C.S. e ENGEL, B.A. (1997) - "Predicting spatial distribution of vulnerability of Indiana State Aquifer system to nitate leaching using a GIS", *in* http://ncgia.ucsb.edu/conf/SANTA_FE_CD-ROM/sf_papers/navulur_kumar/my_paper.html

NOVO, M.E. e LOBO-FERREIRA, J.P. (1990) - "Proposta de Aplicação do Modelo GLEAMS à Região de Aveiro para a Modelação do Transporte de Poluentes de Origem Agrícola em Meios Não-Saturados". Lisboa, LNEC, Relatório 214/90 - GIAS, 30 pp.

USEPA (1992) - "Another Look: National Survey of Pesticides in Drinking Water Wells Phase II Report", USEPA 579/09-91-020. EPA Washington, DC.

P4:

ALLER, L., TRUMAN, W.B., HACKETT, G., PETTY, R., LEHR, J.H., SEDORIS, H., NIELSEN, D.M. e DENNE, J.E. (1989) - "Handbook of Suggested Practices for the Design and Installation of Ground Water Monitoring Wells. US Environmental Protection Agency". EPA 600/4-89/034. Dublin, Ohio, 398 pp.

CANTER, L.W., KNOX, R.C. e FAIRCHILD, D.M. (1987) - "Ground Water Quality Protection". Michigan, Lewis Publishers, Inc., 1987, 562 pp.

CLARK, L. (1992) - "Monitoring and Protecting Ground Water Quality". Pollution Prevention, Vol. 3, Issue 4, pp. 51-56.

EPA (1978) - "Process Design Manual Municipal Sludge Landfills". U.S. Department of Commerce, National Technical Information Service, EPA, Cincinnati, OH.

LEITÃO, T.E., LOBO-FERREIRA, J.P. e PÁSSARO, D. (1995) - "Assessment of Pollution Hazards in the Estarreja Aquifer (Portugal). Remediation Strategies". Artigo publicado nos Anais do NATO-ASI realizado em Moscovo, em Julho de 1995; e Poster apresentado ao seminário "Groundwater Quality Remediation and Protection", realizado em Praga, em Maio de 1995.

LOBO-FERREIRA, J.P. (1989) - "On Groundwater Pollution Modelling and Control", in "Interregional Seminar on Water Quality Management in Developing Countries" realizado em Varsóvia, Polónia, em Setembro de 1989, pelo United Nations/DTCD de Nova Iorque.

LOBO-FERREIRA, J.P. (1989) - "On Groundwater Pollution Modelling and Control", in "Interregional Seminar on Water Quality Management in Developing Countries" realizado em Varsóvia, Polónia, em Setembro de 1989, pelo United Nations/DTCD de Nova Iorque.

LOBO-FERREIRA, J.P. (1996) - "On the Application of Stochastic Inverse Modelling, Aquifer vulnerability Assessment and Groundwater Flow and Mass Transport Modelling in the Fractured Semi-Confined Aquifer of Bagueixe, in Portugal", in "Regional Approaches to Water Pollution in the Environment", (Ed. P.E. Rijtema e V. Eliáš), NATO-AS1 Series 2: Environment - Vol. 20, Dordrecht, D. Reidel Publishing Comp., 1996. (Key-Lecture apresentada ao "NATO Advanced Research Workshop on Regional Approaches to Water Pollution in the Environment", realizado em Liblice, na República Checa, em Set. 95.)

LOBO-FERREIRA, J.P. (1997) - "GIS and Mathematical Modelling for the Assessment of Vulnerability and Geographical Zoning for Groundwater Management and Protection". Key-lecture ao NATO ARW "Environmental Contamination and Remediation Practices at Former and Present Military Basis", Lituânia, in Kluwer Academic Publishers, Fonnum *et al.* (Ed. 1998) "Environmental Contamination and Remediation Practices at Former and Present Military Bases", 143-170.

MA (1998) - "Workshop Construção e Exploração de Aterros de RSU". Ministério do Ambiente, Instituto dos Resíduos, 1998.

UE (1997) - "Draft Proposal for a Council Directive on the Landfill of Waste". Comunicação de 24/1/97, 48 pp.

P5:

CIABATTI, P. e LOBO FERREIRA, J.P. (1994) – "Desenvolvimento de um Inventário das Águas Subterrâneas de Portugal. Análise de Legislação sobre Zonamento de Protecção de Captações de Águas Subterrâneas. Aplicação a Dois Casos de Estudo Portugueses". Relatório 247/94 – GIAS. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa. Outubro de 1994.

LOBO-FERREIRA, J.P. e CIABATTI, P. (1996) - "Recomendações para a Protecção e Gestão Integrada de Captações de Águas Subterrâneas em Portuga". Comunicação Convidada ao 3º Congresso da Água, organizado pela Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, em Lisboa, de 25 a 29 de Março de 1996.

P6 e P6-CHINA:

APPELO, C.A.J. e POSTMA, D. (1993) - "Geochemistry, Groundwater and Pollution". Holanda, A.A. Balkema Publishers, 1993, pp. 536.

DAHAB, M.F. (1991) - "Nitrate Treatment Methods: an Overview", in "Nitrate Contamination: Exposure, Consequences and Control", Eds. I. Bogárdi e R.D. Kuzelka, Nato ASI Series, Series G: Ecological Sciences, Vol. 30, Berlim, Springer-Verlag, pp. 349-368.

HAMON, M. e FUSTEC, E. (1991) - "Laboratory and Field Study of an *in situ* Groundwater Denitrification Reactor". Research Journal of the Water Pollution Control Federation, Vol. 63, nº 7, pp. 942-949.

HISCOCK, K.M., LLOYD, J.W. e LERNER, D.M. (1991) - "Review of Natural and Artificial Denitrification of Groundwater". Water Research, Vol. 25, nº 9, pp. 1099-1111.

LEITÃO, T.E. (1997) - "Metodologias para a Reabilitação de Aquíferos Poluídos". Tese de Doutoramento apresentada à Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, publicada nas Teses e Programas de Investigação do LNEC, TPI 11, ISBN 972-49-1733-9, Lisboa, 1997, 493 pp.

LEITÃO, T.E., LOBO-FERREIRA, J.P. e INÁCIO, M. (1994) - "Metodologias para a Recuperação de Águas Subterrâneas e Solos Contaminados. Partes C, D, E e F". Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil e Direcção-Geral da Qualidade do Ambiente, 1994, pp. 190.

LEITÃO, T.E., LOBO-FERREIRA, J.P. e ZUNGAILIA, E. Jr. (1993) - "Tecnologias para a Monitorização e Reabilitação de Aquíferos Poluídos". Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Relatório 39/94 - GIAS, 1992, pp. 107.

LEITÃO, T.E., ZUNGAILIA, E. Jr. e LOBO-FERREIRA, J.P. (1992) - "Metodologias para a Recuperação de Águas Subterrâneas e Solos Contaminados. Partes A e B". Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil e Direcção-Geral da Qualidade do Ambiente, 1992, pp. 107.

LOBO, M.A.G. (1993) - "Presença de Nitratos na Água como Consequência da Actividade Agropecuária". Universidade dos Açores, Departamento de Ciências Agrárias, 1993, 51 pp.

LOBO-FERREIRA, J.P., OLIVEIRA, M.M. e MOINANTE, M.J., 1994 - "Protecção das Águas Doces Costeiras e Estuarinas Contra a Poluição por Nitratos. Caracterização do Estado das Águas Subterrâneas em Relação à Poluição Causada por Nitratos". Relatório 43/94 - GIAS, Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1994, pp. 90.

LOBO-FERREIRA, J.P., OLIVEIRA, M.M., LEITÃO, T.E., NOVO, M.E., MOINANTE, M.J., MOREIRA, P. e HENRIQUES, M. J. (1999) - "Caracterização dos Recursos Hídricos Subterrâneos da Área Abrangida pelo Plano de Bacia Hidrográfica do Rio Tejo. Anexo Temático 10 - Qualidade dos Meios Hídricos. Tomo 10B - Qualidade das Águas Subterrâneas". Relatório Final da Fase 1. Março de 1999, 117 pp.

MARIOTTI, A., 1986 - "La Dénitrification dans les Eaux Souterraines, Principes et Méthodes de son Identification: une Revue". Journal of Hydrology, Vol. 88, nº 1 e 2, pp. 1-23.

ROHMANN, U. e SONTHEIMER, H., 1985 - "Nitrat im Grundwasser: Ursachen, Bedeutung und Lösungswege". Karlsruhe, Druckerei G. Braun GmbH, 1985, pp. 468

VAN DER HOEK, J.P. e KLAPWIJK, A., 1987 - "Nitrate Removal from Ground Water". Water Research, Vol. 21, nº 8, pp. 989-997.

VAN DER HOEK, J.P., VAN DER VEN, P.J.M. e KLAPWIJK, A., 1988 - "Combined Ion Exchange/Biological Denitrification for Nitrate Removal from Ground Water under Different Process Conditions". Water Research, Vol. 22, nº 6, pp. 679-684.

P7 e P7-MERCOSUR:

LOBO-FERREIRA J.P. e OLIVEIRA, M.M., LEITÃO T.E., NOVO, M.E., MOINANTE, M. J., MOREIRA, P. e HENRIQUES, M.J. (1999b) - "Avaliação da Qualidade das Águas Subterrâneas do Plano de Bacia do Tejo", *in "Sessão Pública de Apresentação e Exposição do Plano Nacional da Água e dos Planos de Bacia Hidrográfica"*, CCB, Lisboa, 9 de Abril, 1999.

LOBO-FERREIRA, J.P. (1988) - "A Comparative Analysis of Mathematical Mass Transport Models and Tracer Experiments for Groundwater Pollution Studies". Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Memória nº 724, 1988.

LOBO-FERREIRA, J.P. (1986) - "A Dispersão de Poluentes em Águas Subterrâneas. Análise Custo-Eficácia de Modelos Matemáticos e Ensaios de Traçadores para a Realização de Estudos de Impacto Ambiental". Tese para Especialista do LNEC, Lisboa, LNEC.

NOVO, M.E. e LOBO-FERREIRA, J.P. (1990) - "Proposta de Aplicação do Modelo GLEAMS à Região de Aveiro para a Modelação do Transporte de Poluentes de Origem Agrícola em Meios Não-Saturados". Lisboa, LNEC, Relatório 214/90 - GIAS, 30 pp.

NOVO, M.E. e LOBO-FERREIRA, J.P. (1994) - "Estudo sobre a Análise da Influência da Água Subterrânea dos Campos da Golegã no Paúl do Boquilobo. Relatório de Progresso". Lisboa, LNEC, Relatório 314/94 - GIAS, 51 pp.

THEVES, T. e LOBO-FERREIRA, J.P. (1995) - "Literature Review of Unsaturated Soil Modelling, and Conceptual Considerations for the Lagamine Model". Lisboa, LNEC, Relatório 280/95 - GIAS, 39 pp.

P8 e P8-MEDEA:

CARREIRA, P.M., MACEDO, M.E., SOARES, A.M.M., VIEIRA, M.C. e SANTOS, J.B. (1994) - "Origem da Salinização no Sistema Aquífero da Bacia do Baixo Sado, na Região de Setúbal". Revista da Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Vol. 15, nº1, pp. 41 - 48.

COSTA, F.E., BRITES, J.A., PEDROSA, M.Y. e SILVA, A. V. (1985) - "Carta Hidrogeológica da Orla Algarvia". Lisboa, Serviços Geológicos de Portugal.

CUNHA M.C. e ANTUNES, A. J P. (1997) - "On the Efficient Location of Pumping Facilities in an Aquifer System". International Transactions of Operational Research, Vol.4, B13, pp 175-184.

CUNHA, M.C. (1990) - "Un Modèle d'Optimisation pour la Gestion des Ressources en Eau. Le Cas d'un Systeme Hydriques à Composante Souterraine et Composante Superficielle". Tese de Doutoramento, Louvain-la-Neuve, 1990

CUNHA, M.C. (1992) - "Evolução dos Modelos de Gestão de Sistemas Hídricos Subterrâneos: A Vertente Relacionada com a Investigação Operacional". Comunicação ao 5º Congresso da Associação Portuguesa para o Desenvolvimento da Investigação Operacional IO 92, Évora.

CUNHA, M.C. (1994) - "Exploração optimizada de sistemas aquíferos". Actas do 6º Simpósio Luso-Brasileiro de Hidráulica e Recursos Hídricos, pp.43-54, Lisboa, Abril.

CUNHA, M.C. (1995) - "Localização óptima de Captações em Sistemas Aquíferos". Desenvolvimento Sustentável dos Recursos Hídricos, ABRH Publicações nº1 Vol 2, pp. 115- 120.

CUNHA, M.C. (1996) - "O Planeamento e a Gestão de Sistemas Aquíferos: Breve Síntese das Principais Linhas da Investigação Actual". Comunicação ao Seminário "Recursos Hídricos Subterrâneos em Portugal: Quantidade e Qualidade", LNEC - Janeiro.

CUNHA, M.C. (1997) - "Sobre a Utilização de Algoritmos de Pesquisa Aleatória na Gestão de Sistemas Aquíferos". Actas do 3' Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa, Vol 1, Comunicação 16, Maputo, Abril.

CUNHA, M.C. (1999) - "On Solving Aquifer Management Problems With Simulated Annealing Algorithms". Water Resources Management (aceite para publicação)

CUNHA, M.C. e ANTUNES, A. J. P (1994) - "Optimal Design of Water Supply Structures at Regional Level". Proceedings of VIII1th IWRA World Congress on Water Resources, Vol 2 (T6-S 1), pp. 1. 1 - 1. 18, Cairo, Novembro.

CUNHA, M.C., HUBERT, P. e TYTECA, D. (1993) - "Optimal Management of a Groundwater System for Seasonally Varying Agricultural Production". Water Resources Research, Vol 29(7), pp. 2415-2426.

EVANGELISTA, I. M. (1989) - "Intrusion Marina y Salinizacion en la Comunidad Valenciana" *in El Agua en la Comunidad Valenciana*, editado por Marcet, E. C. e Herráiz, A. S., Universidad Politécnica de Valencia. Generalitat Valenciana, pp. 503 - 524.

GABBANI, G., GARGINI, A. (1992) - "An Application of the Archie´s Law to the hydrogeological Investigation of an Alluvial Coastal Plain". Study and Modelling of Saltwater Intrusion Into Aquifers. Proceedings 12th Saltwater Intrusion Meeting, Barcelona, Spain, pp. 617-630.

JIANGONG, W., DESAN, Z., MINGCHUAN, J. (1992) - "Sea Water Intrusion and its Control in the Shandong Coastal Zone, Eastern China". Study and Modelling of Saltwater Intrusion Into Aquifers. Proceedings 12th Saltwater Intrusion Meeting, Barcelona, Spain, pp. 729-739.

MIGLIARI, E. e LOBO-FERREIRA, J. P. (1997) - "Groundwater Optimal Management. A Literature Review and an Application to Palmela Water Supply System". Lisboa, LNEC, Relatório 215/97 - GIAS, 105 pp.

SANTOS, F.D.B.S., BORREGO, C.A.D.S., SANTANA, F.J.P., RAMALHO, M.M. e SANTOS, J.M.F. (1991) - "Livro Branco sobre o Estado do Ambiente em Portugal". Lisboa, Ministério do Ambiente e dos Recursos Naturais.

SILVA, M.O. e SILVA, M.L. (1992) - "Impactos da Agricultura na Qualidade Química das Águas Subterrâneas. Os exemplos da Campina da Luz (Tavira) e da Campina de Faro". Lisboa, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, GEOLIS, Vol. VI, Fasc. 1 e 2, pp. 136 - 145.

VERMEULEN, H., LOBO-FERREIRA. J.P. e OLIVEIRA,M.M. (1993) - "A Method for Estimating Aquifer Recharge in DRASTIC Vulnerability Mapping". Comunicação apresentada ao Seminário "Águas Subterrâneas e Ambiente", realizado pela Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos (APRH) em Lisboa, Maio de 1993 e à "Second European Conference on Advances in Water Resources Technology and Management", realizada em Lisboa em Junho de 1994. Rotterdam, A.A. Balkema, European Water Resources Association.

P10-INTAS:

LEITÃO, T.E., LOBO-FERREIRA, J.P. e PÁSSARO, D. (1995) - "Assessment of Pollution Hazards in the Estarreja Aquifer (Portugal). Remediation Strategies". Artigo publicado nos Anais do NATO-ASI realizado em Moscovo, em Julho de 1995; e Poster apresentado ao seminário "Groundwater Quality Remediation and Protection", realizado em Praga, em Maio de 1995.

LOBO-FERREIRA, J.P. (1989) - "On Groundwater Pollution Modelling and Control", in "Interregional Seminar on Water Quality Management in Developing Countries" realizado em Varsóvia, Polónia, em Setembro de 1989, pelo United Nations/DTCD de Nova Iorque.

LOBO-FERREIRA, J.P. (1996) - "On the Application of Stochastic Inverse Modelling, Aquifer Vulnerability Assessment and Groundwater Flow and Mass Transport Modelling in the Fractured Semi-Confined Aquifer of Bagueixe, in Portugal", in "Regional Approaches to Water Pollution in the Environment", (Ed. P.E. Rijtema e V. Eliáš), NATO-AS1 Series 2: Environment - Vol. 20, Dordrecht, D. Reidel Publishing Comp., 1996. (Key-Lecture apresentada ao "NATO Advanced Research Workshop on Regional Approaches to Water Pollution in the Environment", realizado em Liblice, na República Checa, em Set. 95.)

LOBO-FERREIRA, J.P. (1998) - "GIS and Mathematical Modelling for the Assessment of Vulnerability and Geographical Zoning for Groundwater Management and Protection". Key-lecture ao NATO ARW "Environmental Contamination and Remediation Practices at Former and Present Military Basis", Lituânia, in Kluwer Academic Publishers, Fonnum et al. (Ed. 1998) "Environmental Contamination and Remediation Practices at Former and Present Military Bases", 143-170.

P11:

LOBO-FERREIRA, J.P., MELO BAPTISTA, J., DELGADO RODRIGUES, J. e VEIGA DA CUNHA, L. (1981) - "Estudo Global dos Recursos Hídricos da Ilha do Porto Santo". Lisboa, LNEC, Relatório - NHHF, 1981.

LOBO-FERREIRA, J. P. e OLIVEIRA, M.M. (1993b) - "Desenvolvimento de um Inventário das Águas Subterrâneas de Portugal - Caracterização dos Recursos Hídricos Subterrâneos e Mapeamento DRASTIC da Vulnerabilidade dos Aquíferos de Portugal. Relatório Final". Relatório nº 179/93 - GIAS.

LOBO-FERREIRA, J.P. (1991) - "Plano para a Gestão dos Recursos Hídricos da Ilha de S. Miguel - Açores. Avaliação da Recarga dos Aquíferos da Ilha de S. Miguel". Lisboa, LNEC, Relatório 239/91 - GIAS, 86 pp.

LOBO-FERREIRA, J.P. e OLIVEIRA, M.M. (1994b) - "EIA Integrado para o Empreendimento do Alqueva. Análise dos Aquíferos da Zona do Perímetro de Rega, em Particular da sua Produtividade e Vulnerabilidade à Poluição". Lisboa, LNEC, Relatório 300/94 - GIAS, 35 pp.

LOBO-FERREIRA, J.P., OLIVEIRA, M.M., MOINANTE, M.J., THEVES, T. e DIAMANTINO, C.

(1995d) - "Avaliação da Vulnerabilidade da Capacidade de Recepção das Águas e Zonas Costeiras. Meios Receptores e Suas Características: Meios Subterrâneos - Mapeamento das Águas Subterrâneas da Faixa Costeira Litoral e da Vulnerabilidade dos seus Aquíferos à Poluição". Relatório Específico R3.3". Lisboa, LNEC, Relatório 237/95 - GIAS, 585 pp.

MENESES, J. G. (1993) - "Hidrologia e Hidrogelogia da Ilha Terceira - Grandes Condicionantes", *in* Comunicações ao Seminário Recursos Hídricos e Ambiente na Região Autónoma dos Açores, Angra do Heroísmo, Abril e Maio de 1993.

NOVO, M. E., LOBO FERREIRA, J. P. C. e LEITÃO, T. (1994) - "Zonamento da Vulnerabilidade à Poluição dos Recursos Hídricos Subterrâneos da Ilha da Madeira", in Anais do VI SILUBESA - Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, ABRH / APRH, Florianópolis, Brasil, 1994.

NOVO, M.E., LEITÃO, T.E., TORE, C. e LOBO-FERREIRA, J.P. (1994) - "Avaliação dos Recursos Hídricos Subterrâneos da Ilha da Madeira. Relatório Final". Lisboa, LNEC, Relatório 99/94 - GIAS, 159 pp.

NOVO, M.E., LOBO-FERREIRA, J.P. e LEITÃO, T.E. (1994) - "Aplicação da Metodologia DRASTIC na Determinação do Zonamento da Vulnerabilidade à Poluição dos Aquíferos da Ilha da Madeira". Lisboa, LNEC, Relatório 160/94 - GIAS, 68 pp. 186)

NOVO, M.E., LOBO-FERREIRA, J.P., COTA RODRIGUES e BRITO DE AZEVEDO, E. (1997) - "A Inter-relação entre Pluviosidades, Níveis Aquíferos e suas Nascentes em Ilhas Vulcânicas: o Caso das Nascentes do Cabrito (Ilha Terceira - Açores)", in Seminário sobre "Águas Subterrâneas", Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Lisboa, 10 a 12 de Dezembro de 1997 e 4º Congresso da Água, organizado pela APRH, Lisboa, Março de 1998, pp. 10.

RODRIGUES, F. Cota (1993) - "Hidrogeologia da Ilha Terceira. Contributo para o seu Conhecimento". Universidade dos Açores, Angra do Heroísmo.

P12-AC2-BINGO 2000:

LOBO-FERREIRA, J.P. (1999) - "The European Experience in Groundwater Vulnerability Assessessment and Mapping", in Proceedings dos Workshops "Coastal Hot Spots: Constituents and Drivers" e "Coastal Hot Spots" realizados em Goa, Índia, em 22 de Fevereiro de 1999, no âmbito do projecto INCO-DC "Monitoring, Measuring, Managing Sustainability: the Coastal Dimension", 5 pp.

LOBO-FERREIRA, J.P. e TILAK VIEGAS, F.J. (1999) - "S&T Co-operation with Asia in the Area of Sustainable Management of Natural Resources. A Co-ordination Meeting, China 1998. Beijing, P. R. China, Nov. 24-27, 1998. Draft Executive Summary". Bruxelas, DGXII, EBNIC Newsletters, Spring 1999, 12 pp.

CAPÍTULO DÉCIMO - CONCLUSÃO

LOBO-FERREIRA, J. P. (1993) - "Estudo Preparatório para Definição de Projectos de Ambiente Elegíveis no Contexto do Fundo de Coesão - Indicadores do Estado do Ambiente para Águas Subterrâneas". Lisboa, LNEC, Relatório 99/93 - GIAS, 63 pp.

LOBO-FERREIRA, J. P. (1999a) - "Resenha de Actividade". Lisboa, LNEC, Resenha apresentado a concurso para acesso à categoria de Investigador-Coordenador do Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

NEVES, E. Beja e NUNES CORREIA, F. (1994) - "Indicadores para Planeamento e Gestão Ambiental", *in Plano Nacional da Política do Ambiente*, (*Ed.* NUNES CORREIA *et al.*,1994). Lisboa, Ministério do Ambiente e Recursos Naturais.

NUNES CORREIA, F., LIBERATO, P. Nunes, NEVES, E. Beja. e LEITÃO, A. G. (1994) - "Plano Nacional da Política do Ambiente". Lisboa, Ministério do Ambiente e Recursos Naturais.

QUINTELA, A. C. (1981) - "Hidráulica". Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian.

POSFÁCIO

... E, assim caminhando, descobri o poço ao nascer do dia.

Lentamente icei o balde até ao bocal do poço. E pu-lo ali bem a prumo. Nos meus ouvidos prolongava-se o canto da roldana e na água que tremia ainda, via tremer o sol.

- *Tenho sede desta água, disse o principezinho, dá-me de beber...*

... Ele bebeu, de olhos fechados. Era suave como uma festa. Aquela água era bem mais do que um alimento... "

....era água subterrânea.

Tirando partido do notável desempenho dos elementos do Grupo de Investigação de Águas Subterrâneas (GIAS.DH.LNEC), estudámo-la ao longo destes últimos oito anos. Gostaria de citar pelos seus nomes os do *quadro*: Doutora Teresa Eira Leitão, Dr. Manuel M. Oliveira, Dra. Mª Emília Novo, Dra. Mª João Moinante e *licencianda* Maria José Henriques.

Sector de Edições e Artes Gráficas o LNEC