



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS E SEUS IMPACTOS NOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS EM ILHAS DE PEQUENA DIMENSÃO

Caso de estudo: Açores – ilha Terceira

Maria Emília de Jesus Silva Novo

Investigadora Auxiliar, LNEC

LISBOA • 2009

Tese elaborada no Laboratório Nacional de Engenharia Civil em 2007 para obtenção do grau de Doutor em Engenharia do Ambiente pela Universidade dos Açores

**TESES E PROGRAMAS
DE INVESTIGAÇÃO**

NOVO, Maria Emília

Licenciada em Geologia, Mestre em Geologia Económica e Aplicada, Doutora em Engenharia do Ambiente
Departamento de Hidráulica do Ambiente

A publicação desta Tese integra-se num projecto de investigação (CLIMAAT e CLIMARCOST - FEDER, INTERREG__3B, Açores Madeira e Canárias – MAC/2.3/A4 – 0.3/MAC/2.3/A5 – 05/MAC/2.3/A1)

Teses e Programas de Investigação LNEC é uma colecção editorial do Laboratório Nacional de Engenharia Civil destinada a divulgar os trabalhos de investigação realizados no LNEC e de que resultaram Teses apresentadas em concurso para Investigador Auxiliar do LNEC, Teses de Doutoramento apresentadas em Universidades portuguesas e estrangeiras, e Programas de Investigação apresentados em concurso para obtenção do título de Habilitação para o Exercício das Funções de Coordenação Científica.

Editado na mesma colecção:

- TPI 55 VIEGAS, João C. — *Utilização de ventilação de impulso em parques de estacionamento cobertos. (2008)*
- TPI 56 CALDEIRA, Laura M. M. Saraiva — *Análises de risco em geotecnia. Aplicação a barragens de aterro. (2008)*
- TPI 57 MOTA, Rogério — *Metodologias de prospecção geofísica aplicadas a problemas ambientais e geotécnicos. Aplicação conjunta de métodos eléctricos e sísmicos. (2008)*
- TPI 58 VEIGA, Maria do Rosário — *Conservação e reparação de revestimentos de paredes de edifícios antigos. Métodos e materiais. (2009)*
- TPI 59 PIMENTA, Lurdes — *Abordagens de riscos em barragens de aterro. (2009)*

Copyright © LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL, I.P.
Divisão de Divulgação Científica e Técnica
AV DO BRASIL 101 • 1700-066 LISBOA
e-e: livraria@lnec.pt
www.lnec.pt

Editor: LNEC

Colecção: Teses e Programas de Investigação LNEC

Série: TPI 60

1.ª edição: 2009

Tiragem: 100 exemplares

Descritores: Alterações climáticas / Água subterrânea / Impacte ambiental / Aquíferos / Recarga de aquífero / Zona insular / Tese / PT

Descriptors: Climate changes / Groundwater / Environmental impact / Aquifers / Aquifer recharge / Insular region / Thesis / PT

CDU 556.33.52:551.583(043)(469)

ISBN 978-972-49-2181-5

ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS E SEUS IMPACTOS NOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS EM ILHAS DE PEQUENA DIMENSÃO (CASO DE ESTUDO: AÇORES – ILHA TERCEIRA)

RESUMO

As alterações climáticas, motivadas por origens naturais e/ou ação antrópica, têm impactos nas várias componentes do ciclo da água. As regiões insulares são, pelas suas características de litologia, estrutura geotectónica, dimensões, topografia, condicionantes geográficas e natureza hidrogeológica, bastante susceptíveis aos impactos das alterações climáticas, que se podem reflectir segundo duas vertentes: (1) a alteração do nível médio das águas do mar; (2) a alteração dos parâmetros climáticos (precipitação e temperatura). Os impactos das alterações climáticas actuam sobre os recursos hídricos modificando a sua qualidade (ex.: via intrusão salina) e a sua quantidade (ex.: por redução da precipitação total e aumento da temperatura média, causando um decréscimo nos volumes de recarga). O impacto das alterações climáticas sobre os recursos hídricos tem sido estudado sobretudo para a parte superficial do ciclo da água, havendo no geral um grande desconhecimento dos impactos sobre os recursos hídricos subterrâneos, que no entanto são geralmente vitais para as zonas insulares. Neste estudo apresenta-se uma **análise dos possíveis impactos das alterações climáticas sobre os recursos hídricos subterrâneos** dos Açores – essencialmente no vector quantidade – analisando tanto os impactos devidos à modificação local do nível das águas do mar, face aos cenários de subida global do nível médio das águas do mar, como às modificações do clima que se admite venham a ocorrer nesta região. Com base nos resultados obtidos relativamente à previsão destes impactos e nas respostas admissíveis dos sistemas aquíferos a estas modificações, procurou-se desenvolver **uma metodologia de determinação da vulnerabilidade dos recursos hídricos subterrâneos das regiões insulares às alterações climáticas**, extensível às zonas costeiras.

Palavras-chave:

Alterações climáticas, GCM, RCM, aquíferos, águas subterrâneas, impactos das alterações climáticas, recarga de aquíferos

ABSTRACT

Climate changes, due to natural origins and/or antropic activities, promote a cascade of impacts over the several components of the water cycle. The insular regions are highly susceptible to these impacts due to their characteristics of topography, lithology, geological structure, dimensions, geography and hydrogeological constraints. Two distinct vectors generate such impacts: (1) the

global mean sea level change, (2) the change of climatic constraints and parameters (e.g. rainfall and temperature). The impacts generated by climate changes affect the surface water and groundwater resources, modifying their quality (e.g. as a consequence of saline intrusion) and quantity (e.g. the reduction of total amount of rainfall and the increase of the average temperature can generate a decrease in the volumes of water allocated for recharge of aquifers). The impacts of climate changes over water resources have been studied mainly for the surface part of the water cycle, and in general there is a significant lack of knowledge about these impacts on groundwater resources, which, nevertheless, are usually vital for insular regions. In this study we present an **analysis of the possible climate change's impacts on groundwater resources** in the Azores islands – both concerning mainly the quantity aspects – focusing on the impacts due to the changes of local versus global sea level, as well as the ones due to the type of local climate changes which are predicted to occur in this region. Based on the results concerning the predicted impacts and the predicted responses of the aquifer systems to such changes, a **methodology for assessing the vulnerability of groundwater resources to climate changes** is developed and described. This methodology, although developed for insular regions, is structured in a way that allows it to be used in other coastal environments.

Key-words:

Climate changes, GCM, RCM, aquifers, groundwater, climate change impacts, aquifer recharge

RÉSUMÉ

Les altérations climatiques, soient-elles au bien a origines naturelles et/au bien a origine anthropique, ont des impacts sur les différentes parties du cycle hydrologique. Les régions insulaires sont, à cause de sa nature lithologique, de structure geo-tectonique, dimensions, topographie, conditions géographiques et nature hydrogéologique, susceptibles aux impacts des altérations climatiques. Ces impacts sont déclenchés selon deux types de processus : (1) l'altération du niveau moyen des eaux de la mer, (2) l'altération des paramètres climatiques (précipitation et température, par exemple). Les impacts des altérations climatiques se font sentir sur les ressources hydriques, en changeant sa qualité (e.g. a conséquence de l'intrusion saline) et quantité (e.g. la réduction de précipitation et incrément de la température origine une réduction des volumes d'eau disponibles pour la recharge). L'impact des altérations climatiques sur les ressources hydriques a été étudié surtout pour la partie superficielle du cycle de l'eau, au fur et a mesure que se vérifie une signifiante malconnaissance des impacts sur les ressources hydriques souterraines qui, malgré tout, sont en général d'importance capitale pour les régions insulaires. A cause de ça, dans cette étude ont présente une **analyse des possibles impacts des altérations climatiques sur les ressources hydriques souterraines** des Açores – surtout l'analyse de la quantité – en étudiant les impacts créés par l'altération du niveau

locale de la mer, encadré dans les scénarios d'altération globale et par les modifications du climat local qu'on croit qui peuvent subir dans cette région. Enraciné sur les résultats concernés à la prévision de ces impacts et aux réponses des systèmes aquifères à ces modifications, on a développé une **méthodologie d'analyse de la vulnérabilité des ressources hydriques souterraines aux altérations climatiques**. Cette méthodologie, qui a été créée pour des régions insulaires, est néanmoins structurée de façon à qu'on puisse l'utiliser sur d'autres types de régions littorales.

Mots-clé:

Altérations climatiques, MCG, MCR, aquifères, eaux souterraines, impacts des altérations climatiques, recharge d'aquifères

ÍNDICE DE TEXTO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJECTIVOS	1
1.2. ENQUADRAMENTO GERAL DO PROBLEMA	2
1.3. RELEVÂNCIA DO TEMA “ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS E RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS”.....	4
1.4. ESTRUTURA DA TESE	6
2. ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS: O QUE SÃO, SUAS CAUSAS POSSÍVEIS E SEUS POSSÍVEIS IMPACTOS	8
2.1. ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS: O QUE SÃO?.....	8
2.2. ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS: SUAS CAUSAS.....	9
2.3. ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS: SEUS POSSÍVEIS IMPACTOS.....	18
3. ESTADO DOS CONHECIMENTOS SOBRE ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS E HIDROGEOLOGIA DOS AÇORES	33
3.1. AVALIAÇÃO DO ESTADO DOS CONHECIMENTOS SOBRE ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS.....	33
3.2. AVALIAÇÃO DO ESTADO DOS CONHECIMENTOS SOBRE OS IMPACTOS DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS EM PORTUGAL CONTINENTAL E NOS AÇORES.....	45
3.3. AVALIAÇÃO DO ESTADO DOS CONHECIMENTOS SOBRE A HIDROGEOLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS DOS AÇORES	47
3.4. ÁREAS DE CONHECIMENTO A NECESSITAR DE FUTUROS ESTUDOS	55
4. IMPACTOS DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS: ALTERAÇÕES NOS PADRÕES DE TEMPERATURA E PRECIPITAÇÃO DEVIDO AO AQUECIMENTO ATMOSFÉRICO GLOBAL	60
4.1. PALEOEVOLUÇÃO DO CLIMA E ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS PASSADAS.....	64
4.2. O CLIMA ACTUAL NA REGIÃO DOS AÇORES E TENDÊNCIAS DE EVOLUÇÃO.....	65
4.3. APLICAÇÃO DOS CENÁRIOS DE EVOLUÇÃO DAS PRECIPITAÇÕES, EVAPOTRANSPIRAÇÕES, CICLONES, TEMPESTADES TROPICAIS E OUTROS EVENTOS EXTREMOS AOS MODELOS DE BALANÇO HÍDRICO.....	72
4.3.1. <i>Cenários de Precipitação e Evapotranspiração: Alteração na Distribuição Anual e Volumes Anuais Totais de Precipitação e Evapotranspiração</i>	73
4.3.1.1. <i>Discussão dos Resultados e Conclusões</i>	81
4.3.2. <i>Modificações nas Durações e Intensidades dos Eventos de Precipitação</i>	82
4.3.3. <i>Modificações na Frequência, Intensidade e Distribuição Anual de Ciclones, Tempestades Tropicais e Outros Fenómenos Extremos</i>	83
5. IMPACTOS DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS: MUDANÇAS NOS REGIMES DE PRECIPITAÇÃO E SEUS IMPACTOS SOBRE A RECARGA DE AQUÍFEROS	85
5.1. EFEITOS DAS VARIAÇÕES NOS REGIMES E INTENSIDADES DE PRECIPITAÇÃO SOBRE A RECARGA DE AQUÍFEROS.....	88
5.1.1. <i>Determinação dos Efeitos das Alterações de Regimes e Intensidades de Eventos de Precipitação sobre a Recarga de Aquíferos nos Açores</i>	88

5.1.1.1. Metodologias de Cálculo da Recarga de Aquíferos.....	89
5.1.1.2. Determinação da Recarga de Aquíferos nos Açores para Diferentes Cenários Admitidos de Alteração dos Regimes de Precipitação	92
5.1.1.3. Determinação do Escoamento Superficial nos Açores para Diferentes Cenários Admitidos de Alteração dos Regimes de Precipitação	107
5.2. EFEITOS DAS VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS VERSUS EVAPOTRANSPIRAÇÕES SOBRE A RECARGA DE AQUÍFEROS.....	116
5.2.1. <i>Cálculo da Recarga de Aquíferos em Cenários de Evapotranspiração Apenas sob Alteração Térmica</i>	117
5.3. EFEITOS DAS ALTERAÇÕES NOS REGIMES, INTENSIDADES E FREQUÊNCIAS DE EVENTOS EXTREMOS SOBRE A RECARGA DE AQUÍFEROS.....	134
5.4. A RECARGA DE AQUÍFEROS NAS ILHAS DOS AÇORES PARA VÁRIOS CENÁRIOS DE PRECIPITAÇÃO E EVAPOTRANSPIRAÇÃO: CONCLUSÕES	135
6. ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS INTRÍNSECAS DOS VÁRIOS SISTEMAS HIDROGEOLÓGICOS INSULARES E SUA RESPOSTA ÀS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS	140
6.1. CARACTERIZAÇÃO GERAL DOS SISTEMAS HIDROGEOLÓGICOS DA ILHA TERCEIRA QUANTO À SUA GÉNESE E IDADE	140
6.2. CARACTERIZAÇÃO GERAL DOS SISTEMAS HIDROGEOLÓGICOS DA ILHA TERCEIRA QUANTO ÀS SUAS PROPRIEDADES HIDRÁULICAS	143
6.3. CARACTERIZAÇÃO GERAL DOS SISTEMAS HIDROGEOLÓGICOS DA ILHA TERCEIRA QUANTO AO SEU FUNCIONAMENTO HIDROGEOLÓGICO.....	145
6.4. RESPOSTA DOS SISTEMAS HIDROGEOLÓGICOS, EM FUNÇÃO DAS SUAS PROPRIEDADES INTRÍNSECAS, ÀS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS	156
6.4.1. <i>Resposta dos Sistemas Hidrogeológicos aos Cenários de Alterações Climáticas: Classificação das Susceptibilidades às Alterações Climáticas dos Sistemas Aquíferos em Função das suas Propriedades Intrínsecas</i>	158
6.4.2. <i>Caracterização das Regiões de Recarga e Escoamento Superficial Preferenciais para os Vários Cenários de Alterações Climáticas</i>	165
6.5. CARACTERIZAÇÃO CLIMÁTICA DOS SISTEMAS HIDROGEOLÓGICOS INSULARES: CENÁRIO ACTUAL E CENÁRIOS FUTUROS	167
6.6. PROPRIEDADES DOS AQUÍFEROS, SUA RESPOSTA ÀS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS E SEU CONDICIONAMENTO DA RECARGA	170
6.6.1. <i>Definição da Relação entre Tipos de Aquíferos e Idades Versus Alteração da Capacidade de Infiltração para Cenários de Alteração Climática</i>	171
6.6.2. <i>Caracterização da Resposta dos Sistemas Aquíferos Face à Recarga</i>	173
6.6.2.1. Resposta da Litologia à Recarga Versus Idade e Propriedades Hidráulicas	173
6.6.3. <i>Conclusões</i>	174
7. RESPOSTA DOS SISTEMAS AQUÍFEROS À ALTERAÇÃO DO NÍVEL DO MAR COMO RESULTADO DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS.....	176
7.1. CARACTERIZAÇÃO DA RESPOSTA DOS SISTEMAS AQUÍFEROS DE BASE FACE À INTRUSÃO SALINA	180
7.1.1. <i>Resposta da Litologia à Intrusão Salina vs. Idade e Propriedades Hidráulicas</i>	181
7.1.2. <i>Definição e Caracterização das Zonas Afectadas pela Alteração do Nível do Mar</i>	183

8. IMPACTO DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS NOS RECURSOS DISPONÍVEIS E NOS CONSUMOS HUMANOS.....	187
8.1. INVENTÁRIO DOS PONTOS DE ÁGUA DOS AÇORES.....	187
8.2. CENÁRIOS DE CONSUMOS HUMANOS E ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS.....	189
8.3. ALTERAÇÃO DE VOLUMES ANUAIS DAS DESCARGAS DE NASCENTES EM FUNÇÃO DE CENÁRIOS DE ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS	198
8.4. CENÁRIOS DE VARIAÇÃO DE RECURSOS DISPONÍVEIS E STRESS HÍDRICO FACE AOS CENÁRIOS DE VARIAÇÃO DOS CONSUMOS.....	200
8.4.1. <i>Impactos Das Variações dos Consumos nas Reservas Hídricas e Evolução do Stress Hídrico em Diferentes Cenários de Alterações Climáticas</i>	203
8.4.2. <i>Vulnerabilidade dos Aquíferos à Estiagem e Impactos Das Variações do Stress Hídrico sobre os Aquíferos</i>	204
9. ANÁLISE DA INCERTEZA ASSOCIADA AOS CENÁRIOS DE ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS E VARIÁVEIS HIDROLÓGICAS.....	212
9.1. METODOLOGIAS DE ANÁLISE DA INCERTEZA.....	212
9.2. ANÁLISE DA INCERTEZA ASSOCIADA ÀS ALTERAÇÕES DO NÍVEL DO MAR.....	213
9.2.1. <i>Discussão do Problema e Resultados</i>	213
9.3. ANÁLISE DA INCERTEZA DOS RESULTADOS DOS CENÁRIOS DE ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS SOBRE A RECARGA	215
9.3.1. <i>Incerteza Associada à Previsão das Precipitações: Discussão do Problema</i>	216
9.3.2. <i>Incerteza na Previsão das Evapotranspirações: Discussão do Problema</i>	216
9.3.3. <i>Modelação da Incerteza Associada à Previsão dos Escoamentos Superficiais: Discussão do Problema</i>	217
9.3.4. <i>Modelação da Incerteza Associada à Previsão das Recargas: Discussão do Problema</i>	217
10. VULNERABILIDADE DOS AQUÍFEROS ÀS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS.....	220
10.1. METODOLOGIAS DE ANÁLISE DE VULNERABILIDADE ÀS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS.....	222
10.1.1. <i>Metodologias de Vulnerabilidade à Subida do Nível do Mar/Intrusão Salina</i>	223
10.1.2. <i>Aplicação da Metodologia GALDIT na Ilha Terceira para os Cenários de Alterações Climáticas</i>	229
10.2. METODOLOGIA DE ANÁLISE DA VULNERABILIDADE DOS SISTEMAS AQUÍFEROS ÀS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS	236
10.2.1. <i>A Componente de Vulnerabilidade dos Aquíferos Às Alterações Climáticas: Aspectos Quantitativos</i>	243
10.2.2. <i>A Componente de Vulnerabilidade dos Aquíferos Às Alterações Climáticas: Aspectos Qualitativos</i>	247
10.2.3. <i>A Componente de Vulnerabilidade dos Aquíferos Às Alterações Climáticas: Actividades Económicas</i>	251
10.4. DISCUSSÃO DA ANÁLISE DA INCERTEZA ASSOCIADA À DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS E METODOLOGIAS DE DETERMINAÇÃO DA VULNERABILIDADE ÀS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS.....	255
11. CONCLUSÕES FINAIS	257

11.1 SÍNTESE.....	257
11.2. CONCLUSÕES	259
11.2.1. <i>Introdução</i>	259
11.2.2. <i>Determinação da Recarga em Cenários de Alterações Climáticas</i>	261
11.2.3. <i>Resposta das Propriedades dos Aquíferos às Alterações Climáticas</i>	265
11.2.4. <i>Resposta dos Aquíferos às Alterações do Nível do Mar</i>	266
11.2.5. <i>Consumos Humanos e Stress Hídrico em Cenários de Alterações Climáticas</i>	267
11.2.6. <i>Metodologia de Vulnerabilidade dos Aquíferos às Alterações Climáticas</i>	268
11.3. ÁREAS DE PESQUISA FUTURA	270
12. BIBLIOGRAFIA.....	275
ANEXO 1. IMPACTOS DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS: A ALTERAÇÃO DO NÍVEL DO MAR	301
ANEXO 2. CORRESPONDÊNCIA ENTRE AS UNIDADES AQUÍFERAS DE NOVO ET AL. (2001) E OS SISTEMAS AQUÍFEROS DE DROTRH E IA (2001).....	318

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Localização do Arquipélago dos Açores.....	3
Figura 2 – Evolução da Temperatura de Superfície Terrestre nos Últimos 140 anos e nos Últimos 1 000 anos (Working Group I do IPCC, 2001 c).....	13
Figura 3 – Taxas de Evolução do Forcing Atmosférico dos Gases de Efeito de Estufa (NASA, 2000 a).....	16
Figura 4 - Reconstrução da Evolução das Temperaturas no Hemisfério Norte do Último Milénio (Working Group I do IPCC, 2001 c).....	16
Figura 5 – Cenários de Alteração da Temperatura Média Anual para o ano 2080 para os 3 Cenários Base de Emissões; topo – sem redução de emissões; meio – estabilização da emissão de CO ₂ a 750 ppm; baixo – estabilização da emissão de CO ₂ a 550 ppm (Working Group II do IPCC, 2001).....	19
Figura 6 – Variação Média Anual da Temperatura (em °C) para os cenários SRES (topo: cenário A2; base: cenário B2) para o Período de 2071 a 2100 em relação a 1961-1990, a Partir dos resultados dos Modelos Climáticos Globais (Working Group II do IPCC, 2001).....	20
Figura 7 - Cenários de Alteração da Precipitação Média Anual para o ano 2080 para os 3 Cenários Base de Emissões; topo – sem redução de emissões; meio – estabilização da emissão de CO ₂ a 750 ppm; baixo – estabilização da emissão de CO ₂ a 550 ppm (Working Group II do IPCC, 2001).....	23
Figura 8 - Cenários de Alteração do Escoamento Médio Anual no ano 2080 Segundo os Resultados de Dois Modelos Climáticos Globais do Hadley Center; a – HadCM2 média global e b – HadCM3 (IPCC, 2001 b).....	24
Figura 9 – Previsões da Subida do Nível do Mar para o ano 2080 para os 3 Cenários Base de Emissões; vermelho – sem redução de emissões; azul – estabilização da emissão de CO ₂ a 750 ppm; verde – estabilização da emissão de CO ₂ a 550 ppm (Working Group II do IPCC, 2001).....	25
Figura 10 – Subida do Nível do Mar para os Vários Cenários SRES desde 1990 a 2100 (Working Group I do IPCC, 2001 c).....	26
Figura 11 – Impactos das Alterações Climáticas sobre o Ciclo Hidrológico (Working Group I do IPCC, 2001 c).....	29
Figura 12 – Número de dias no ano com precipitação superior a (observações de 1961-1990): topo) 2,1 mm/dia; base) 10 mm/dia (SIAM, 2005; Miranda <i>et al.</i> , 2005).....	61
Figura 13 – Evolução da precipitação sazonal em Angra do Heroísmo (ilha Terceira – Açores) ao longo do século XX; as rectas a tracejado indicam a média no período 1961-1990 (SIAM, 2005; Miranda <i>et al.</i> , 2005).....	61
Figura 14 – Evolução da média anual das temperaturas máximas e mínimas em Angra do Heroísmo (ilha Terceira – Açores) ao longo do século XX (SIAM, 2005; Miranda <i>et al.</i> , 2005).....	63
Figura 15 – Evolução da precipitação sazonal na Terceira (SRES – Controlo) para o ano 2100: (a) Inverno (cenário A2); (b) Inverno (cenário B2); (c) Verão (cenário A2); (d) Verão (cenário B2) (SIAM, 2005; Miranda <i>et al.</i> , 2005).....	67
Figura 16 – Evolução da precipitação anual na Terceira para o ano 2100: (a) cenário A2; (b) cenário B2 (SIAM, 2005; Miranda <i>et al.</i> , 2005).....	67
Figura 17 – Evolução da temperatura máxima no Verão (Terceira) para o ano 2100: (a) cenário A2; (b) cenário B2 (SIAM, 2005; Miranda <i>et al.</i> , 2005).....	68
Figura 18 – Evolução da temperatura mínima no Inverno (Terceira) para o ano 2100: (a) cenário A2; (b) cenário B2 (SIAM, 2005; Miranda <i>et al.</i> , 2005).....	68

Figura 19 – Cenários de alteração da precipitação para Portugal Continental [modelo HadRM2 (cenário de emissão IS92a) em percentagem da simulação de controlo: (a) Anual; (b) Inverno; (c) Primavera; (d) Verão; (e) Outono] in Miranda <i>et al.</i> (2005)..	69
Figura 20 – Cenários de alteração da precipitação para Portugal Continental [modelo HadRM3 (cenário de emissão A2): (a) Anual; (b) Inverno; (c) Primavera; (d) Verão; (e) Outono] in Miranda <i>et al.</i> (2005)	70
Figura 21 – Cenários de alteração da precipitação para Portugal Continental [modelo HadRM3 (cenário de emissão B2): (a) Anual; (b) Inverno; (c) Primavera; (d) Verão; (e) Outono] in Miranda <i>et al.</i> (2005)	71
Figura 22 – Cenários de alteração da temperatura mínima no Inverno: (a) HadRM2, cenário IS92a, (b) HadRM3, cenário A2; (c) HadRM3, cenário B2, in Miranda <i>et al.</i> (2005).....	72
Figura 23 – Cenários de alteração da temperatura máxima no Verão: (a) HadRM2, cenário IS92a, (b) HadRM3, cenário A2; (c) HadRM3, cenário B2, in Miranda <i>et al.</i> (2005).....	72
Figura 24 – Evolução da Temperatura em Angra desde 1874 (dados de Azevedo e Gonçalves, 1993 in DROTRH e IA, 2001).....	74
Figura 25 – Evolução da Evapotranspiração Real (Turc) em Angra desde 1874 (dados de Azevedo e Gonçalves, 1993 in DROTRH e IA, 2001).....	75
Figura 26 - Evolução da Precipitação em Angra desde 1874 (dados de Azevedo e Gonçalves, 1993 in DROTRH e IA, 2001).....	78
Figura 27 – Variação (em % de variação) da Recarga em Cenários Teóricos Baseados na Possível Variação da Precipitação no Sentido da Descida, Aplicados às Séries de Precipitação para o Cabrito (ilha Terceira).....	95
Figura 28 – Correlação da Variação (em %) da Recarga versus Variação da Precipitação (Cenários Teóricos Baseados na Possível Variação da Precipitação no Sentido da Descida, Aplicados às Séries de Precipitação para o Cabrito - ilha Terceira).....	97
Figura 29 – Correlação do Valor Médio (em mm) da Recarga versus Variação da Precipitação (Cenários Teóricos Baseados na Possível Variação da Precipitação no Sentido da Descida, Aplicados às Séries de Precipitação para o Cabrito - ilha Terceira).....	97
Figura 30 – Variação (em % de variação) da Recarga em Cenários Teóricos Baseados na Possível Variação da Precipitação no Sentido da Subida para os Açores, Aplicados às Séries de Precipitação para o Cabrito (ilha Terceira)	100
Figura 31 – Correlação da Variação (em %) da Recarga versus Variação da Precipitação (Cenários Teóricos Baseados na Possível Variação da Precipitação no Sentido da Subida, Aplicados às Séries de Precipitação para o Cabrito - ilha Terceira)	101
Figura 32 – Correlação do Valor Médio (em mm) da Recarga versus Variação da Precipitação (Cenários Teóricos Baseados na Possível Variação da Precipitação no Sentido da Subida, Aplicados às Séries de Precipitação para o Cabrito - ilha Terceira)	101
Figura 33 – Correlação da Variação (em %) da Recarga versus Variação da Precipitação (Totalidade dos Cenários Teóricos de Variação da Precipitação, Aplicados às Séries de Precipitação para o Cabrito - ilha Terceira).....	102
Figura 34 – Correlação do Valor Médio (em mm) da Recarga versus Variação da Precipitação (Totalidade dos Cenários Teóricos de Variação da Precipitação, Aplicados às Séries de Precipitação para o Cabrito - ilha Terceira).....	102

Figura 35 – Variação da Recarga por Tipo de Solo/Vegetação para Cenários de Subida da Precipitação (Aplicados às Séries de Precipitação para o Cabrito - ilha Terceira).....	106
Figura 36 – Variação da Recarga por Tipo de Solo/Vegetação para Cenários de Descida da Precipitação (Aplicados às Séries de Precipitação para o Cabrito - ilha Terceira).....	106
Figura 37 – Variação (em mm) do Escoamento Superficial em Cenários Teóricos Baseados na Possível Variação da Precipitação no Sentido da Descida, Aplicados às Séries de Precipitação para o Cabrito (ilha Terceira)	109
Figura 38 – Correlação da Variação (em %) do Escoamento Superficial versus Variação da Precipitação (Cenários Teóricos de Precipitação no Sentido da Descida, Aplicados às Séries de Precipitação para o Cabrito - ilha Terceira).....	109
Figura 39 – Correlação do Valor Médio (em mm) do Escoamento Superficial versus Variação da Precipitação (Cenários Teóricos de Precipitação no Sentido da Descida, Aplicados às Séries de Precipitação para o Cabrito - ilha Terceira).....	110
Figura 40 – Correlação do Valor Médio (em %) do Escoamento Superficial versus Variação da Precipitação (Cenários Teóricos de Variação Constante da Precipitação no Sentido da Descida, Aplicados às Séries de Precipitação para o Cabrito - ilha Terceira).....	111
Figura 41 – Correlação do Valor Médio (em %) do Escoamento Superficial versus Variação da Precipitação (Cenários Teóricos de Variação Sazonal da Precipitação no Sentido da Descida, Aplicados às Séries de Precipitação para o Cabrito - ilha Terceira).....	111
Figura 42 – Variação (em mm/ano) do Escoamento Superficial em Cenários Teóricos Baseados na Possível Variação da Precipitação para os Açores, Aplicados às Séries de Precipitação para o Cabrito (ilha Terceira).....	112
Figura 43 – Correlação da Variação (em %) do Escoamento Superficial versus Variação da Precipitação (Cenários Teóricos Baseados na Possível Variação da Precipitação no Sentido da Subida, Aplicados às Séries de Precipitação para o Cabrito - ilha Terceira).....	114
Figura 44 – Correlação do Valor Médio (em mm) do Escoamento Superficial versus Variação da Precipitação (Cenários Teóricos Baseados na Possível Variação da Precipitação no Sentido da Subida, Aplicados às Séries de Precipitação para o Cabrito - ilha Terceira).....	114
Figura 45 – Correlação da Variação (em %) do Escoamento Superficial versus Variação da Precipitação (Totalidade dos Cenários Teóricos de Variação da Precipitação, Aplicados às Séries de Precipitação para o Cabrito - ilha Terceira)....	115
Figura 46 – Correlação do Valor Médio (em mm) do Escoamento Superficial versus Variação da Precipitação (Totalidade dos Cenários de Variação da Precipitação, Aplicados às Séries de Precipitação para o Cabrito - ilha Terceira).....	115
Figura 47 – Variação (em % de variação) da Recarga em Cenários Teóricos Baseados na Possível Variação da Evapotranspiração no Sentido da Subida, Aplicados às Séries de Evapotranspiração para o Cabrito (ilha Terceira)	119
Figura 48 – Correlação da Variação (em %) da Recarga versus Variação da Evapotranspiração (Cenários Teóricos Baseados na Possível Variação da Evapotranspiração no Sentido da Subida, Aplicados às Séries de Evapotranspiração para o Cabrito - ilha Terceira).....	120
Figura 49 – Correlação do Valor Médio (em mm) da Recarga versus Variação da Evapotranspiração (Cenários Teóricos Baseados na Possível Variação da	

Evapotranspiração no Sentido da Subida, Aplicados às Séries de Evapotranspiração para o Cabrito - ilha Terceira).....	120
Figura 50 – Variação (em % de variação) da Recarga em Cenários Teóricos Baseados na Possível Variação da Evapotranspiração para os Açores, Aplicados às Séries de Precipitação para o Cabrito (ilha Terceira).....	123
Figura 51 – Correlação da Variação (em %) da Recarga versus Variação da Evapotranspiração (Cenários Teóricos Baseados na Possível Variação da Evapotranspiração no Sentido da Descida, Aplicados às Séries de Evapotranspiração para o Cabrito - ilha Terceira).....	124
Figura 52 – Correlação do Valor Médio (em mm) da Recarga versus Variação da Evapotranspiração (Cenários Teóricos Baseados na Possível Variação da Evapotranspiração no Sentido da Descida, Aplicados às Séries de Evapotranspiração para o Cabrito - ilha Terceira).....	125
Figura 53 – Correlação da Variação (em %) da Recarga versus Variação da Evapotranspiração (Totalidade dos Cenários Teóricos de Variação da Evapotranspiração, Aplicados às Séries de Evapotranspiração para o Cabrito - ilha Terceira).....	125
Figura 54 – Correlação do Valor Médio (em mm) da Recarga versus Variação da Evapotranspiração (Totalidade dos Cenários Teóricos de Variação da Evapotranspiração, Aplicados às Séries de Evapotranspiração para o Cabrito - ilha Terceira).....	126
Figura 55 – Variação da Recarga por Tipo de Solo/Vegetação para Cenários de Descida da Evapotranspiração (Aplicados às Séries de Evapotranspiração para o Cabrito - ilha Terceira).....	129
Figura 56 – Variação da Recarga por Tipo de Solo/Vegetação para Cenários de Subida da Evapotranspiração (Aplicados às Séries de Evapotranspiração para o Cabrito - ilha Terceira).....	129
Figura 57 – Evolução do Nível do Mar em Angra do Heroísmo – totalidade da série, valores mensais	177
Figura 58 – Evolução do Nível do Mar em Angra do Heroísmo – totalidade da série, valores anuais.....	177
Figura 59 – Evolução do Nível do Mar em Angra do Heroísmo – série de 1933 a 1962, valores mensais	178
Figura 60 – Evolução do Nível do Mar em Angra do Heroísmo – série de 1933 a 1962, valores anuais.....	178
Figura 61 – Evolução do Nível do Mar em Angra do Heroísmo – série de 1976 a 1985, valores mensais	179
Figura 62 – Evolução do Nível do Mar em Angra do Heroísmo – série de 1976 a 1985, valores anuais.....	179
Figura 63 – Semi-variograma dos Níveis do Mar (valores mensais) para a Estação de Angra do Heroísmo.....	214
Figura 64 – Semi-variograma dos Níveis do Mar (valores anuais) para a Estação de Angra do Heroísmo.....	214
Figura 65 – Metodologia GALDIT para a ilha Terceira: Parâmetro G	232
Figura 66 – Metodologia GALDIT para a ilha Terceira: Parâmetro A	233
Figura 67 – Metodologia GALDIT para a ilha Terceira: Parâmetro L.....	233
Figura 68 – Metodologia GALDIT para a ilha Terceira: Parâmetro D	234
Figura 69 – Metodologia GALDIT para a ilha Terceira: Parâmetro I.....	234
Figura 70 – Metodologia GALDIT para a ilha Terceira: Parâmetro T.....	235

Figura 71 – Metodologia GALDIT para a ilha Terceira: zonamento da vulnerabilidade dos aquíferos à subida do nível do mar (Índice GALDIT)235

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro I – Concentrações de Gases de Efeito de Estufa Susceptíveis a Alterações Devido a Atividades Humanas (Working Group I do IPPC 2001 a).....	14
Quadro II – Balanço Global de CO ₂ (em PgC/ano) Baseado em Medições Atmosféricas de CO ₂ e O ₂ (Working Group I do IPPC 2001 a).....	14
Quadro III – Classes de Vulnerabilidade para a Metodologia EVI (Kally <i>et al.</i> , 1999 b).....	39
Quadro IV – Classes de Indicadores de Vulnerabilidade para a Metodologia EVI (Kally <i>et al.</i> , 1999 b).....	39
Quadro V – Classes de Vulnerabilidade da Global Vulnerability Assessment Methodology (Hoozemans e Hulsberg, 1993; SURVAS, 2000).....	40
Quadro VI – Variação da Evapotranspiração Real com o Aumento da Temperatura Média Anual, Considerando a Precipitação Média Anual Constante.....	74
Quadro VII – Cenários de Evapotranspiração Teóricos Estabelecidos para Analisar a Resposta da Componente Recarga à Alteração da Evapotranspiração.....	76
Quadro VIII – Valores Estabelecidos pelos Cenários Teóricos de Redução de Precipitação para Analisar a Resposta da Componente Recarga à Alteração da Precipitação (série de precipitação do Cabrito).....	79
Quadro IX – Cenários Teóricos de Incremento de Precipitação Estabelecidos para Analisar a Resposta da Componente Recarga à Alteração da Precipitação (série de precipitação do Cabrito).....	79
Quadro X – Distribuição da Precipitação (valores médios) em Cenários Teóricos de Redução de Precipitação (série de precipitação do Cabrito).....	80
Quadro XI – Distribuição da Precipitação (valores médios) em Cenários Teóricos de Aumento de Precipitação (série de precipitação do Cabrito).....	81
Quadro XII – Variação das Recargas num Mesmo Aquífero Face a Redução das Precipitações.....	94
Quadro XIII – Variação da Recarga (valor médio anual) num Mesmo Aquífero Face a Variação das Precipitações (% de Descida).....	96
Quadro XIV – Variação das Recargas num Mesmo Aquífero Face a Subida das Precipitações.....	99
Quadro XV – Variação da Recarga (valor médio anual) num Mesmo Aquífero Face a Variação das Precipitações (% de Subida).....	100
Quadro XVI – Variação do Escoamento Superficial (valor médio anual) num Mesmo Aquífero Face a Redução das Precipitações.....	108
Quadro XVII – Variação do Escoamento Superficial (valor médio anual) num Mesmo Aquífero Face a Variação das Precipitações (% de Descida).....	108
Quadro XVIII – Variação do Escoamento Superficial (valor médio anual) num Mesmo Aquífero Face a Subida das Precipitações.....	112
Quadro XIX – Variação do Escoamento Superficial (valor médio anual) num Mesmo Aquífero Face a Variação das Precipitações (% de Subida).....	113
Quadro XX – Variação das Recargas num Mesmo Aquífero Face a Subida das Evapotranspirações.....	118
Quadro XXI – Variação da Recarga (valor médio anual) num Mesmo Aquífero Face a Variação das Evapotranspirações (% de Subida).....	118
Quadro XXII – Variação das Recargas num Mesmo Aquífero Face a Descida das Evapotranspirações.....	122

Quadro XXIII – Variação da Recarga (valor médio anual) num Mesmo Aquífero Face a Variação das Evapotranspirações (% de Descida).....	123
Quadro XXIV – Variação das Recargas em Função da Alteração na Evapotranspiração e Precipitação em Conformidade com os Cenários de Alteração Climática Previstos para os Açores por SIAM (2003) e Brito e Gonçalves (2001) ..	131
Quadro XXV – Variação da Recarga (valor médio anual) num Mesmo Aquífero Face a Variação das Evapotranspiração (% de Descida) e Precipitação (% de Subida)	132
Quadro XXVI – Variação do Escoamento Superficial (valor médio anual) num Mesmo Aquífero Face a Variação Simultânea dos Valores de Precipitação e Evapotranspiração.....	133
Quadro XXVII – Variação do Escoamento Superficial (valor médio anual) num Mesmo Aquífero Face a Variação Simultânea dos Valores de Precipitação e Evapotranspiração.....	134
Quadro XXVIII – Valores de Recarga para as Ilhas dos Açores Determinados pelo Método dos Cloretos e BALSEQ, para as Condições Climáticas Actuais	135
Quadro XXIX – Valores de Recarga para a Ilha Terceira Determinados pelo Método do BALSEQ, para Diferentes Cenários de Alterações Climáticas (Subida de Precipitação)	137
Quadro XXX – Valores de Recarga para a Ilha Terceira Determinados pelo Método do BALSEQ, para Diferentes Cenários de Alterações Climáticas (Descida de Precipitação)	138
Quadro XXXI – Valores de Recarga para a Ilha Terceira Determinados pelo Método do BALSEQ, para Diferentes Cenários de Alterações Climáticas (Subida da Evapotranspiração)	138
Quadro XXXII – Valores de Recarga para a Ilha Terceira Determinados pelo Método do BALSEQ, para Diferentes Cenários de Alterações Climáticas (Descida da Evapotranspiração)	138
Quadro XXXIII – Valores de Recarga para a Ilha Terceira Determinados pelo Método do BALSEQ, para Diferentes Cenários de Alterações Climáticas (Variação da Precipitação e Evapotranspiração).....	139
Quadro XXXIV – Caracterização dos Sistemas Hidrogeológicos da Ilha Terceira Quanto a Génese e Idade.....	141
Quadro XXXV – Aquíferos da Ilha Terceira (adaptado de Rodrigues, 2002 a).....	143
Quadro XXXVI – Propriedades Hidráulicas Conhecidas dos Aquíferos da Ilha Terceira (DROTRH e IA, 2001; Novo <i>et al.</i> ; 2001)	144
Quadro XXXVII – Produtividades Conhecidas dos Aquíferos da Ilha Terceira.....	145
Quadro XXXVIII – Zonamento Hidrogeológico da Ilha Terceira	148
Quadro XXXIX – Idades e Estados de Alteração dos Principais Sistemas/Unidades Hidrogeológicas da Ilha Terceira.....	148
Quadro XL – Permeabilidade Média das Regiões Hidrogeológicas da Ilha Terceira com Base em Critérios Geomorfológicos e Informação do Plano Regional da Água dos Açores.....	149
Quadro XLI – Tipos de Litologias das Unidades Produtivas por Regiões Hidrogeológicas da Ilha Terceira.....	152
Quadro XLII – Relação entre os Aspectos que Afectam a Susceptibilidade dos Aquíferos às Alterações Climáticas e seus Factores Condicionantes.....	159
Quadro XLIII – Factores de Susceptibilidade dos Aquíferos às Alterações Climáticas, Analisando Permeabilidades e Armazenamentos	160
Quadro XLIV – Susceptibilidade dos Aquíferos às Alterações Climáticas: Componente Recarga	162

Quadro XLV – Susceptibilidade dos Aquíferos às Alterações Climáticas: Componente Estiagem.....	164
Quadro XLVI – Zonamento Aquíferos versus Microclima Local (Precipitação Média)	168
Quadro XLVII – Susceptibilidades ao Incremento da Intrusão Salina, Escoamento Superficial e Estiagem em Condições de Alteração dos Regimes de Precipitação: Índícios Provisórios	168
Quadro XLVIII – Correlação entre Litologias, Estado de Alteração, Idades e Permeabilidade com Resposta da Capacidade de Infiltração versus Alterações Climáticas	172
Quadro XLIX – Tendências de Evolução do Nível do Mar (em mm/ano) a partir dos Registos de Marégrafos.....	176
Quadro L – Tendências de Evolução do Nível do Mar (em cm ao fim de 100 anos) a Partir dos Registos de Marégrafos	176
Quadro LI – Recuo da Linha de Costa nas Praias de Areia da ilha Terceira.....	180
Quadro LII – Sistemas Aquíferos Passíveis de Sofrer Intrusão Salina.....	181
Quadro LIII – Pontos de Água na Actual Linha de Costa Ameaçados pelos Cenários de Subida do Nível do Mar	184
Quadro LIV – Sectores dos Aquíferos de Base Mais Susceptíveis aos Fenómenos de Intrusão Salina (DROTRH e IA, 2001)	186
Quadro LV – Características (Caudais) de Pontos de Água da Ilha Terceira.....	188
Quadro LVI - Consumos Anuais de Água por Actividade Económica (em m ³) para a Ilha Terceira (DROTRH e IA, 2001).....	190
Quadro LVII – Cargas Poluentes para Actividades Doméstica e Pecuária (DROTRH e IA, 2001).....	191
Quadro LVIII – Carga Poluente em CBO ₅ (ton./ano) para Várias Actividades Económicas (DROTRH e IA, 2001).....	191
Quadro LIX - Relação entre Necessidades e Disponibilidades de Água nas Condições Actuais (DROTRH e IA, 2001)	193
Quadro LX – Consumos Urbanos Previstos para 2020 na Ilha Terceira (DROTRH e IA, 2001).....	194
Quadro LXI – Consumos Urbanos Previstos para 2100 na Ilha Terceira (não considerando as alterações climáticas)	194
Quadro LXII – Consumos Industriais Previstos para 2100 na Ilha Terceira (não considerando as alterações climáticas)	195
Quadro LXIII – Consumos Agro-Pecuários Previstos para 2100 na Ilha Terceira (não considerando as alterações climáticas)	195
Quadro LXIV – Consumos Previstos para os Cenários de Alterações Climáticas (consumos dados em 10 ³ m ³ /ano).....	198
Quadro LXV – Relação entre Caudais das Nascentes do Cabrito e Recargas em Cenários de Alteração da Precipitação	199
Quadro LXVI – Relação entre Caudais das Nascentes do Cabrito e Recargas em Cenários de Alteração da Evapotranspiração	199
Quadro LXVII – Relação entre Caudais das Nascentes do Cabrito e Recargas em Cenários de Alteração da Precipitação e Evapotranspiração mais Adequados aos Açores	200
Quadro LXVIII – Recursos Hídricos Subterrâneos Versus Necessidades da Ilha Terceira	200
Quadro LXIX – Variação da Recarga e Caudais de Nascentes para os Vários Cenários de Alterações Climáticas.....	201

Quadro LXX – Relação Consumos versus Recarga para os Diferentes Cenários de Alteração de Consumos e Alterações Climáticas	202
Quadro LXXI – Relação Consumos versus Recarga e Caudais de Nascentes para Condições Climáticas Actuais (de referência) e Cenários de Evolução dos Consumos (sem considerar alterações climáticas).....	203
Quadro LXXII – Parâmetro Dimensão do Aquífero.....	208
Quadro LXXIII – Parâmetro Tempo de Residência no Aquífero.....	208
Quadro LXXIV – Parâmetro Tempo de Residência (avaliado pela condutividade hidráulica) no Aquífero	209
Quadro LXXV – Parâmetro Distância à Superfície do Solo	209
Quadro LXXVI – Classes de Vulnerabilidade à Estiagem.....	210
Quadro LXXVII – Vulnerabilidade à Estiagem dos Aquíferos da Ilha Terceira	210
Quadro LXXVIII – Parâmetros GALDIT.....	225
Quadro LXXIX – Classes GALDIT	226
Quadro LXXX – Parâmetro G: Ocorrência de Aquíferos	227
Quadro LXXXI – Parâmetro A: Condutividade Hidráulica	227
Quadro LXXXII – Parâmetro L: Altura do Nível de Água Acima do Nível do Mar	228
Quadro LXXXIII – Parâmetro D: Distância à Linha de Costa.....	228
Quadro LXXXIV – Parâmetro I: Impacto do Estado Actual da Intrusão Salina.....	228
Quadro LXXXV – Parâmetro T: Espessura do Aquífero	229
Quadro LXXXVI – Resultados da Metodologia GALDIT para a Ilha Terceira	231
Quadro LXXXVII – Parâmetros de Vulnerabilidade dos Aquíferos às Alterações Climáticas: Aspectos Quantitativos	244
Quadro LXXXVIII – Classes de Vulnerabilidade dos Aquíferos às Alterações Climáticas: Aspectos Quantitativos	246
Quadro LXXXIX – Parâmetros de Vulnerabilidade dos Aquíferos às Alterações Climáticas: Aspectos Qualitativos	247
Quadro XC – Classes de Vulnerabilidade dos Aquíferos às Alterações Climáticas: Aspectos Qualitativos	250
Quadro XCI – Parâmetros de Vulnerabilidade dos Aquíferos às Alterações Climáticas: Aspectos Actividades Económicas	252
Quadro XCII – Classes de Vulnerabilidade dos Aquíferos às Alterações Climáticas: Actividades Económicas	254
Quadro XCIII – Classes de Vulnerabilidade às Alterações Climáticas (componentes atmosférica + nível do mar + antrópica).....	254

ÍNDICE DE EQUAÇÕES

Eq. 1:	$T^o = T_0 - 0,6 \times (At/100)$	65
Eq. 2:	$P = P_0 + 0,25 \times P_0 \times (At/100)$	65
Eq. 3:	$R_m = \frac{\phi \times C_m \times \Delta h}{\int_{1952}^t \frac{P(t')}{P_m} \times C_0(t') \times e^{-\lambda(t-t')} dt}$	91
Eq. 4:	$D_m = Pe \times Ep \times Ar$	207
Eq. 5:	$E = (1 \times D_m + 1 \times TR + 1 \times Pr)/3$	210
Eq. 6:	$GALDIT = (1 \times G + 3 \times A + 4 \times L + 4 \times D + 1 \times I + 2 \times T)/15$	226
Eq. 7:	$GALDIT = \sum_{i=1}^6 [(W_i)R_i] / \sum_{i=1}^6 W_i$	226
Eq. 8:	$GALDIT = (1 \times 10 + 3 \times 10 + 4 \times 10 + 4 \times 10 + 1 \times 10 + 2 \times 10)/15$	226
Eq. 9:	$GALDIT = (1 \times 2,5 + 3 \times 2,5 + 4 \times 2,5 + 4 \times 2,5 + 1 \times 2,5 + 2 \times 2,5)/15$	226
Eq. 10:	$Lc = K \times B^2 / (2 \times q \times 0,0257)$	229
Eq. 11:	$AC1 = (4 \times \Delta RAQ + 4 \times NC + 3 \times Ar + 3 \times Ep + 3 \times Pe + 1 \times TR + 1 \times Dr)/18$	246
Eq. 12:	$AC2 = (4 \times VRAQ + 2 \times ESC_p + 2 \times Prof + 3 \times MAR + 4 \times D + 3 \times K + 2 \times Ep + 3 \times Kv + 2 \times Cps + 4 \times \Delta Veg)/27$	250
Eq. 13:	$AC3 = (2 \times SH + 1 \times CBO + 1 \times CI)/4$	254
Eq. 14:	$VAC = GAL + AC1 + AC2 + AC3$	254

SIMBOLOGIA

λ = Constante de desintegração do trítio (anos^{-1}).
 Δh = Espessura da zona saturada (ou espessura da coluna de água do furo, em metros)
 ΔVeg = Alterações no uso e ocupação do solo
 ΔRAQ = Variação da recarga
 Φ = Porosidade média do aquífero

A = Parâmetro Condutividade hidráulica
 $AC1$ = Vulnerabilidade às Alterações Climáticas/Quantidade
 $AC2$ = Vulnerabilidade às Alterações Climáticas/Qualidade
 $AC3$ = Vulnerabilidade às Alterações Climáticas/Impacto Actividades Humanas
 $AGUT$ = Quantidade de água no solo utilizável na evapotranspiração
 A_r = Área do aquífero
 A_t = Altitude (em m)
 B = Espessura do aquífero
 C_{esc} = Concentração de cloretos no escoamento superficial
 Cl = Cloretos
 C_m = Concentração média de trítio na água extraída por bombagem,
 $C_0(t)$ = Função da entrada de trítio no aquífero,
 C_p = Concentração de cloretos na precipitação global
 C^{ps} = Carga poluente no solo e zona vadosa
 C_r = Concentração de cloretos na água das exurgências (assumida como volume de recarga)
 $\text{CBO} = \text{CBO}$ (Content of Biogenic Oxygen)
 D = Distância à linha de costa
 D_m = Dimensão do aquífero
 D_r = Drenância/ligação hidráulica com outros aquíferos
 E = Índice vulnerabilidade à estiagem
 E_p = Espessura do aquífero
 E_s = Escoamento superficial
 ESC_p = Carga poluente no escoamento superficial
 $ESC_{\text{superficial}}$ = Escoamento superficial
 $\text{ETR} = \text{Evapotranspiração real}$
 G = Ocorrência de aquíferos
 $\text{GAL} = \text{Índice GALDIT (componente nível do mar)}$
 I = Impacto do estado actual da intrusão salina na região
 K = Condutividade hidráulica do aquífero
 K_v = Permeabilidade da zona vadosa
 L = Profundidade ao nível de água acima do nível do mar
 L_c = Comprimento da interface com a água do mar (indica a extensão da intrusão salina)
 $\text{MAR} = \text{Taxa de subida do nível do mar}$
 $\text{NC} = \text{Número característico de escoamento}$
 P = Precipitação (em mm)
 $\text{Prof} = \text{Distância à superfície do solo}$
 P_0 = Precipitação à cota zero/nível do mar (em mm)
 $P(t)$ = Função da precipitação ao longo dos anos
 P_e = Porosidade eficaz
 P_{global} = Precipitação global

P_m = Precipitação anual média
 P_r = Distância à superfície do solo (profundidade do aquífero)
 Q = Fração de cloretos que provém da água da chuva mas de brisas e aerossóis marinhos
 q = Caudal de água doce descarregado no mar
 R = Recarga de aquíferos
 R_i = Parâmetro GALDIT
 R_m = Recarga média
 SH = Stress hídrico
 T = Espessura do aquífero
 T° = Temperatura (em °C)
 T_0 = Temperatura à cota zero/nível do mar (em °C)
 TI = Infiltração superficial
 TR = Tempo de residência das águas
 VAC = Índice de vulnerabilidade às alterações climáticas (componente atmosférica + nível do mar)
 $VRAQ$ = Volume de recarga
 W_i = Peso ponderal do parâmetro GALDIT

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), local onde desenvolvi a Tese, que permitiu a utilização de instalações e equipamentos, assim com da minha formação ao abrigo de projectos de investigação aí realizados.

Agradeço ao Professor Doutor Eduardo Brito de Azevedo, do Departamento de Ciências Agrárias da Universidade dos Açores e orientador deste doutoramento, pelo encorajamento, sugestões, acompanhamento e guia ao longo deste difícil processo, indicando-me fontes de informação vitais, sugerindo linhas de pesquisa e o apoio solidário de todas a vezes que eu estava quase a desistir.

Agradeço ao Investigador-Coordenador João Paulo de Cárcomo Lobo Ferreira, chefe do Núcleo de Águas Subterrâneas do LNEC, co-orientador deste doutoramento, pela sugestão do tema, orientação e incentivo à execução deste, sua leitura atenta, sugestões, críticas e pertinentes modificações de diversos aspectos desta Tese.

Agradeço ao Professor Doutor Francisco Cota Rodrigues, do Departamento de Ciências Agrárias da Universidade dos Açores e co-orientador deste doutoramento nas partes relativas aos aspectos de funcionamento dos aquíferos da ilha Terceira, pelo encorajamento e informações durante a realização desta Tese.

Aos meus colegas do Núcleo de Águas Subterrâneas, pelo apoio e encorajamento que sempre me deram ao longo da realização deste projecto, e pela sua crença em mim quando eu muitas vezes duvidei. Os seus nomes, por ordem alfabética: Catarina Diamantino, João Paulo Lobo Ferreira, Manuel de Oliveira, Maria João Moinante, Maria José Henriques, Teresa Leitão.

Ao Professor Doutor Pedro Miranda, do Centro de Geofísica, do Departamento de Física da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, por toda a informação geral e dados de modelação climática do Projecto SIAM 2, relativos à região dos Açores, assim como pela sua incansável disponibilidade para me ajudar.

Ao Professor Doutor Rui Coutinho, da DROTRH e do Departamento de Geociências da Universidade dos Açores, por toda a informação relativa ao Plano da Água dos Açores, incluindo diversos relatórios técnicos sectoriais, assim como pelo auxílio no acesso à documentação existente na biblioteca da Universidade dos Açores.

Ao Professor Doutor Virgílio Cruz, do Departamento de Geociências da Universidade dos Açores, por toda a informação relativa à hidrogeologia deste arquipélago.

Ao Professor Doutor Rui Taborda, da Faculdade de Ciências de Lisboa, pela informação que me disponibilizou relativamente às questões de subida do nível do mar, e pela sua disponibilidade para discutir alguns dos resultados.

Ao Professor Doutor Paulo Borges, do Departamento de Geociências da Universidade dos Açores, pela informação que me disponibilizou relativamente às

praias de areia desse arquipélago e sobre os processos geomorfológicos e dinâmicos do litoral dos Açores.

À minha colega Doutora Paula Freire e ao Doutor André Fortunato do Núcleo de Estuários e Zonas Costeiras do Departamento de Hidráulica do LNEC, por todas as informações relativas à questão dos marégrafos, assim como à sua constante disponibilidade para me ajudar nas matérias relativas às questões de evolução do litoral.

Ao Sr. Laranjeira, do Instituto Hidrográfico, pelas informações prestadas sobre a situação dos marégrafos dos Açores e respectivos modelos.

À Sra. Maria João Melo, Directora da biblioteca da Universidade dos Açores por toda a informação bibliográfica que me disponibilizou, assim como por todas as facilidades concedidas de consulta desse mesmo material bibliográfico.

Ao Dr. Andrew Morang, da Coastal and Hydraulics Laboratory, Engineer Research and Development Center, por toda a informação que me disponibilizou, assim como contactos com especialistas, sobre as questões da erosão dos litorais não arenosos.

Ao Dr. Mike Burkart, do National Soil Tilth Laboratory, que me forneceu artigos sobre metodologias de avaliação da vulnerabilidade à poluição de aquíferos nos Estados Unidos.

Ao Dr. Alain Dassargues, do GEOMAC, Université de Liège, que me disponibilizou artigos sobre modelação e vulnerabilidade à poluição, tendo-me auxiliado a encontrar a quase indisponível informação sobre a metodologia EPIK.

Ao Professor Doutor Luís Ribeiro, do Instituto Superior Técnico pelo apoio nas questões de análise de variogramas.

Refira-se ainda os principais Projectos de Investigação do LNEC, no âmbito dos quais foi feita a investigação para esta tese:

- Projecto de Investigação Programada (PIP) do LNEC 12034, relativo ao quadriénio 2001-2004: “Avaliação de Recursos e Riscos Hidrogeológicos de Ilhas Vulcânicas”;
- Projecto de Investigação e Desenvolvimento (I&D) do LNEC (Proc. N.º 607/1/12685) relativo ao período 1998-2001: “Desenvolvimento de um Inventário das Águas Subterrâneas dos Açores”.

Agradeço aos meus pais e amigos que sempre acreditaram em mim, mesmo quando eu não acreditei.

Agradeço à Terra e a todos os seres vivos, meus companheiros de jornada pela viagem da vida, porque sem eles a minha existência não seria possível.

ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS E SEUS IMPACTOS NOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS EM ILHAS DE PEQUENA DIMENSÃO (CASO DE ESTUDO: AÇORES)

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo faz-se uma apresentação geral deste trabalho, indicando-se os seus objectivos, enquadramento geral do tema estudado, relevância do tema e estrutura da presente tese de doutoramento.

1.1. Objectivos

Nesta tese pretendeu-se realizar uma análise dos impactos das alterações climáticas nos recursos hídricos subterrâneos e desenvolver metodologias para esta análise, em especial no que respeita à vulnerabilidade dos aquíferos às alterações do clima.

As alterações climáticas afectam os meios hídricos subterrâneos tanto de modo qualitativo como quantitativo. No presente trabalho optou-se por abordar sobretudo os impactos quantitativos, dado que os impactos sobre a qualidade das águas subterrâneas são um campo de investigação extremamente vasto, a necessitar de trabalhos específicos cuja dimensão seria impossível de conter na presente dissertação.

Os objectivos desta tese, nem sempre inteiramente atingidos, foram os seguintes:

1. Cálculo das tendências de alteração das recargas de aquíferos devidas às alterações nos regimes de precipitação e evapotranspiração, para diferentes condições de solo e coberto vegetal;
2. Análise das características intrínsecas dos aquíferos e primeiras abordagens de avaliação da sua resposta às alterações climáticas;
3. Avaliação de impactos das alterações do nível do mar sobre os aquíferos costeiros;
4. Avaliação dos impactos das acções humanas sobre as águas subterrâneas em diferentes cenários de alterações climáticas;
5. Elaboração de uma metodologia de análise da vulnerabilidade de aquíferos às alterações climáticas.

1.2. Enquadramento Geral do Problema

Ilhas tais como os Açores são, pelas suas características de isolamento, completamente dependentes dos factores climáticos para a manutenção e renovação dos seus recursos hídricos. Deste modo os seus recursos hídricos tanto superficiais como subterrâneos são fortemente vulneráveis a alterações do clima. Ao considerar as dimensões – regra geral diminutas, sobretudo quando comparadas com as zonas continentais – tanto do meio hídrico superficial como subterrâneo das regiões insulares, a por vezes muito activa história geotectónica que influencia a evolução do meio hídrico e a interacção deste mesmo meio hídrico com ecossistemas únicos destas estas regiões, é fácil compreender que os sistemas hídricos insulares sejam bastante vulneráveis a toda a espécie de modificações que não apenas as alterações climáticas.

As alterações climáticas, resultantes de uma modificação na temperatura da troposfera, ao provocarem mudanças nos padrões de distribuição, duração, frequência e intensidade dos eventos de precipitação, e admissivelmente na frequência e intensidade dos fenómenos extremos de precipitação, têm capacidade para afectar sectores do ciclo hídrico como a infiltração, evapotranspiração, recarga e escoamento superficial, sendo ainda provável que afectem a qualidade dos recursos hídricos, tanto superficiais como subterrâneos.

Além dos impactos derivados da alteração nas condições meteorológicas, e que podem condicionar o volume hídrico disponível para a recarga de aquíferos, um outro factor associado às alterações climáticas – a subida global do nível do mar – pode ter impactos sobre as águas subterrâneas da faixa costeira do meio hídrico (ex.: por avanço da interface água doce/salgada para o interior dos continentes e ilhas). Sendo que os aquíferos costeiros das ilhas estão completamente cercados pelo mar e não podem receber qualquer abastecimento de outros sistemas aquíferos senão os sobrejacentes (regra geral de menores dimensões e com conexões hidráulicas por vezes complexas), a subida do nível do mar pode colocar estes aquíferos sob um enorme risco em termos de intrusão salina. Este aspecto é tanto mais significativo dada a importância que os aquíferos da zona costeira podem ter no abastecimento das populações insulares.

No caso dos Açores, que constitui a actual área de estudo¹, além dos impactos directos das alterações climáticas sobre os seus recursos hídricos, há ainda a considerar a questão das mudança que estas alterações climáticas podem provocar sobre a Corrente do Golfo, a qual influencia fortemente o clima das regiões adjacentes (em que os Açores se incluem).

Os Açores são um arquipélago que se estende entre as latitudes 36°45' N e 39°43' N e entre as longitudes 24°45' W e 31°17' W, no oceano Atlântico, é constituído por um conjunto de nove ilhas, distribuídas em três grupos (Fig. 1):

- ❖ **O Grupo Oriental** – inclui as ilhas de Santa Maria e São Miguel;
- ❖ **O Grupo Central** – engloba as Terceira, Graciosa, São Jorge, Pico e Faial;
- ❖ **O Grupo Ocidental** – constituído pelas ilhas Flores e Corvo.

¹ Mais precisamente a ilha Terceira.

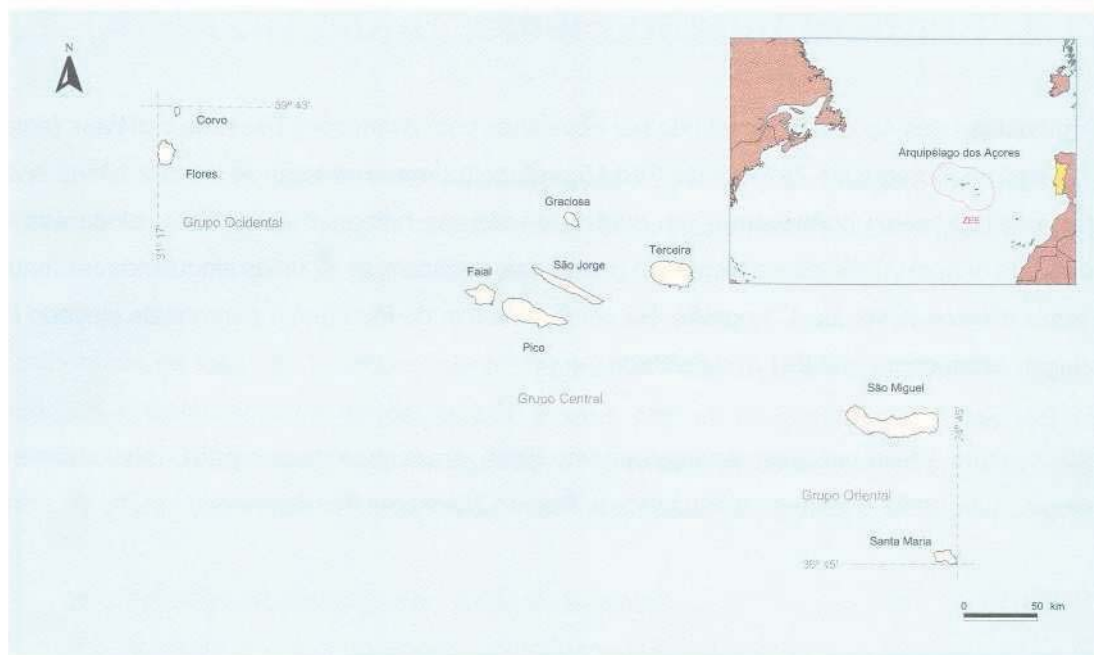


Figura 1 – Localização do Arquipélago dos Açores

É um arquipélago de ilhas vulcânicas cujas características as incluem no grupo das **Ilhas Oceânicas de Relevo Vigoroso** ou “*High Oceanic Islands*” (ver Capítulo 4 e Capítulo 3, Secção 3.1). As suas dimensões, colocam-nas igualmente no grupo das **Pequenas Ilhas**, segundo a definição do Programa Hidrológico Internacional da UNESCO IHP – III Projecto 4.6., que considera como tais as regiões insulares com dimensão inferior a 1 000 Km² ou, no caso de superfície superior, largura igual ou inferior a 10 km (Diaz e Febrillet, 1986), o que lhes confere as seguintes características:

- ❖ **áreas individuais reduzidas** – o que limita o volume de abastecimento a partir da precipitação;
- ❖ **relevo vigoroso** – pouco favorável à retenção de água à superfície, excepto nas zonas de caldeira vulcânica, e portanto favorável a um escoamento superficial muito rápido e de regime torrencial;
- ❖ **tipo de terrenos constituintes** – materiais vulcânicos jovens, heterogéneos, de permeabilidade variável, incluindo meios porosos mas intercalados em meios fracturados, que são aliás a componente dominante, com funcionamento e capacidade de armazenamento típicas de meios fracturados heterogéneos;

Neste estudo procurou-se identificar e estudar os impactos que as alterações climáticas poderão ter nos recursos hídricos de regiões insulares, elegendo como caso de estudo os Açores, definindo se possível a vulnerabilidade dos meios hídricos subterrâneos a estas alterações climáticas, em especial quanto a volumes exploráveis, não esquecendo as mudanças na actividade humana como resposta às alterações do clima, que se reflectirão sobre os recursos hídricos. Para tal procurou-se, integrando as especificidades próprias desta região, sobretudo em termos de funcionamento genérico

de aquíferos, considerar tanto os *efeitos directos* sobre a esfera hídrica – por mecanismos que vão desde as modificações dos padrões de circulação atmosférica e consequente mudança dos regimes meteorológicos às acções da possível subida global do nível do mar – como *impactos indirectos* (ex.: eventuais alterações nos padrões de actividade agrícola, consumo humano e alteração do coberto vegetal não agrícola).

Pela própria natureza dos processos envolvidos, várias disciplinas estão interligadas neste estudo. Muitos destes processos estão em fase de investigação, sendo o seu conhecimento em muitos aspectos ainda parcelar. Um exemplo é o recuo das linhas de costa como resposta à subida do nível do mar (e consequente redução da área dos aquíferos de base); sendo necessários modelos de cálculo destes recuos em função da subida do nível do mar para as zonas de arriba e cascalheiras dos Açores, reconheceu-se que o estabelecimento desses modelos é do foro dos geomorfólogos do litoral, donde optou-se por não analisar este aspecto, senão de uma forma muito genérica, que por esse motivo se apresenta no Anexo 1. Outra área disciplinar envolvida é a da meteorologia, nomeadamente no estabelecimento dos cenários de alteração climática amplamente usados neste trabalho; o estudo dos padrões de circulação atmosférica e sua modificação como consequência das alterações climáticas exige uma grande especialização que sai do âmbito da hidrogeologia. Ao hidrogeólogo interessam menos os detalhes associados aos problemas de modelação atmosférica, mas sim os seus resultados, em especial os relativos a alteração das temperaturas, evapotranspirações, intensidades, frequências e durações de eventos de precipitação, pois são estes factores que se reflectem na resposta dos recursos hídricos subterrâneos às alterações climáticas. Por essa razão ignoraram-se os problemas associados à modelação das alterações dos padrões de circulação atmosférica e clima, optando-se apenas por utilizar os diversos cenários propostos pelos especialistas como base de partida para o estudo que agora se apresenta.

1.3. Relevância do Tema “Alterações Climáticas e Recursos Hídricos Subterrâneos”

As alterações climáticas são um processo que afecta as esferas físicas e biológica do planeta, independentemente de serem despoletadas por causas naturais ou antrópicas. De acordo com o WORKING GROUP I DO IPCC (2001 c) existe um aumento registado de gases de efeito de estufa na atmosfera e, segundo o IPCC (2001) existem provas observadas, de mudanças tanto nos sistemas físicos como biológicos, que são altamente concordantes com o aquecimento observado nas últimas décadas (Cf. Capítulo 2). Parece assim evidente que as alterações climáticas estão a ocorrer e a questão afecta a tal ponto as sociedades humanas que a Organização Meteorológica Mundial e o Programa para o Ambiente das Nações Unidas acabou por estabelecer o Painel Intergovernamental para as Alterações Climáticas (IPCC), em 1988, com o objectivo de:

1. Avaliar a informação científica e sócio-económica sobre alterações climáticas, seus impactos e fornecer medidas de mitigação e adaptação às alterações climáticas;

2. Fornecer aconselhamento científico/técnico/sócio-económico para a Conferência de Membros do Enquadramento da Convenção sobre Alterações Climáticas das Nações Unidas.

A importância das alterações climáticas sobre as sociedades humanas é tal que a partir de 1990 este IPCC passou a elaborar periodicamente relatórios de avaliação, relatórios especiais, artigos técnicos, metodologias de análise e outros produtos, que versam essencialmente: (1) os aspectos científicos intrínsecos ao processo das alterações climáticas, (2) impactos, adaptação e vulnerabilidade, (3) mitigação.

Ao mesmo tempo grandes instituições de reconhecido valor científico, como por exemplo o Meteorological Office, têm dedicado um esforço contínuo à modelação do clima ao estabelecimento de modelos climáticos globais (GCM) e regionais (RCM) com vista a simular os efeitos das alterações climáticas sobre a atmosfera e diversos meteoros.

Em Portugal os estudos das alterações climáticas são uma área de investigação ainda recente, sendo de destacar os estudos das Alterações Climáticas Globais nos Açores e Península Ibérica (Projecto PRAXIS XXI), o projecto “Simulation of Impacts of Global Changes on the Hydrologic Cycle in Relation to the Use of the Soil”, também pertencente ao PRAXIS XXI, focalizado sobre os Açores e o Continente, assim como os estudos do Projecto SIAM 1 e 2, abrangendo áreas que vão desde a simulação de tendências de evolução meteorológica, às alterações do nível do mar, aspectos relacionados com a saúde pública, pescas, agricultura, recursos hídricos, etc.

No caso da hidrosfera, dada a sua dependência directa do clima, qualquer alteração no sistema climático global implica modificações no funcionamento do meio hídrico tanto a nível global como local. Por exemplo, é actualmente admitido que, com o aquecimento global, o ciclo hidrológico sofrerá, na sua generalidade, uma aceleração dos seus processos. Estando o ciclo hidrológico dependente do clima, e estando especificamente a parte subterrânea deste ciclo dependente dos aportes de água que chegam da atmosfera por via directa (ex.: chuva) ou indirecta (ex.: rios), as alterações climáticas são um aspecto muito importante a ter em conta na elaboração de estratégias de exploração futura destes recursos. De facto, e do que acima se refere, conclui-se que a existência e volume explorável de recursos hídricos subterrâneos depende do clima.

Algumas áreas do globo parecem, segundo os indícios observacionais e de modelação, ser mais adversamente afectadas do que outras, estando entre elas as áreas na bordadura das actuais faixas desérticas. Outras áreas particularmente susceptíveis são as regiões insulares, dada a limitação em volume dos seus recursos hídricos, especialmente os subterrâneos, e a sua total dependência do clima que sobre estas áreas vigora.

Assim, em face do acima exposto, compreende-se que seja de especial relevância o estudo da interacção entre as alterações climáticas e os recursos hídricos subterrâneos nas regiões insulares. Sem conhecimentos nesta matéria não será possível estabelecer estratégias de adaptação e mitigação que permitam garantir a salvaguarda dos recursos hídricos nestas condições alteradas de clima, arriscando pelo desconhecimento a sobrevivência futura das populações.

1.4. Estrutura da Tese

Esta dissertação está estruturada do seguinte modo:

- No **Capítulo 2 – Alterações Climáticas: O Que São, suas Causas Possíveis e seus Possíveis Impactos** apresenta-se uma definição do que são alterações climáticas e gases de efeito de estufa, faz-se a enumeração e discussão das suas possíveis causas, os indícios observados da sua ocorrência actual e tendências globais de evolução do clima, e procura-se enumerar o mais extensamente possível, as múltiplas consequências das alterações climáticas que tenham uma relação mais ou menos directa com a hidrosfera.
- No **Capítulo 3 – Estado dos Conhecimentos sobre Alterações Climáticas e Hidrogeologia dos Açores** faz-se uma resenha dos conhecimentos: (1) sobre os diversos aspectos mais importantes das alterações climáticas a nível mundial e a nível nacional, em especial os aspectos associados aos recursos hídricos (recarga, alteração do nível do mar e intrusão salina), descrevem-se diversas metodologias de vulnerabilidade às alterações climáticas (na sua generalidade ligadas aos aspectos da subida do nível do mar e não tanto à recarga de aquíferos), discutem-se as questões da incerteza associada aos modelos climáticos e à evolução do nível do mar, (2) sobre os impactos das alterações climáticas em Portugal Continental e dos primeiros estudos relativos a cenários de alterações climáticas nos Açores, (3) assim como sobre os conhecimentos de hidrogeologia deste arquipélago. Enumeram-se ainda algumas lacunas de conhecimentos sobre alterações climáticas e seu impacto nos sistemas naturais e humanos/humanizados, em particular insulares.
- No **Capítulo 4 – Impactos das Alterações Climáticas: Alterações nos Padrões de Temperatura e Precipitação Devido ao Aquecimento Atmosférico Global** analisa-se as características do clima da região dos Açores e a evolução, com base em cenários, da precipitação, temperatura e evapotranspiração, estabelecendo-se séries de precipitação e de evapotranspiração para cada um destes cenários.
- No **Capítulo 5 – Impactos das Alterações Climáticas: Mudanças nos Regimes de Precipitação e seus Impactos sobre a Recarga de Aquíferos** faz-se o cálculo das recargas de aquíferos, com recurso a modelos de balanço hídrico, utilizando as séries de precipitação e evapotranspiração obtidas no Capítulo 4, estabelecendo-se tendências de evolução das recargas para os vários cenários de alteração da precipitação e/ou evapotranspiração.
- No **Capítulo 6 – Análise das Características Intrínsecas dos Vários Sistemas Hidrogeológicos Insulares e sua Resposta às Alterações Climáticas** define-se a forma como as características intrínsecas dos materiais aquíferos afectam a sua resposta às alterações climáticas, em particular ao nível das recargas. Faz-se a classificação dos aquíferos da ilha Terceira quanto à idade, génese, litologias, propriedades hidráulicas e funcionamento, definindo-se a partir destas propriedades as susceptibilidades dos aquíferos à estiagem, intrusão salina e outros impactos das alterações climáticas; isto serve de base à identificação das regiões onde poderão ocorrer

modificações nos volumes de infiltração, escoamento superficial, etc. para os vários cenários de alteração climática.

- No **Capítulo 7 – Resposta dos Sistemas Aquíferos às Alterações Climáticas: a Intrusão Salina e Outros Impactos** analisa-se a influência da alteração do nível do mar provocada pelas alterações climáticas sobre a susceptibilidade dos aquíferos insulares costeiros à intrusão salina, a qual depende das propriedades intrínsecas dos materiais constituintes destes aquíferos. Procura-se também identificar as regiões onde a intrusão salina devida à alteração do nível do mar poderá ser mais intensa.
- No **Capítulo 8 – Impacto das Alterações Climáticas nos Recursos Disponíveis e nos Consumos Humanos** avaliam-se os impactos das alterações climáticas sobre os consumos humanos e o consequente stress hídrico imposto aos aquíferos na ilha Terceira. Caracterizam-se os tipos de pontos de água existentes (incluindo as suas propriedades hidráulicas e caudais médios anuais e sazonais) e, quando conhecidos, os volumes anuais das nascentes e a percentagem correspondente à recarga directa e à drenância. Definem-se os consumos actuais e cenários de evolução de consumos para cada cenário de alteração climática considerado; para cada cenário de alteração climática a que corresponde uma modificação da recarga directa, determina-se a nova percentagem de recarga escoada pelas nascentes, os volumes de descarga anuais e sazonais, assim como o stress hídrico imposto aos aquíferos.
- No **Capítulo 9 – Análise da Incerteza Associada aos Cenários de Alterações Climáticas e Variáveis Hidrológicas** apresenta-se a análise da incerteza associada a cenários de alterações climáticas quanto à evolução das variáveis hidrogeológicas. Os aspectos de incerteza analisados foram: (1) incerteza das projecções da subida do nível do mar; (2) incerteza das variáveis hidrológicas – precipitação, escoamento superficial, evapotranspiração, recarga; (3) incerteza dos impactos das alterações climáticas sobre a recarga.
- No **Capítulo 10 – Vulnerabilidade dos Aquíferos às Alterações Climáticas** é analisada a vulnerabilidade dos aquíferos às alterações climáticas (vulnerabilidade à subida do nível do mar, modificações na vulnerabilidade à poluição dos aquíferos e efeitos das acções antrópicas face às alterações climáticas) e estabelece-se uma metodologia de avaliação da vulnerabilidade dos sistemas aquíferos às alterações climáticas.
- No **Capítulo 11 – Análise da Incerteza Associada à Determinação dos Parâmetros e Metodologias de Determinação da Vulnerabilidade às Alterações Climáticas** apresentam-se os resultados da análise da incerteza associada aos parâmetros de vulnerabilidade às alterações climáticas.
- No **Capítulo 12 – Conclusões Finais** apresenta-se uma síntese do trabalho, o conjunto de conclusões obtidas nos vários capítulos, faz-se a definição de uma metodologia de estudo dos impactos e da vulnerabilidade dos sistemas aquíferos às alterações climáticas, e avalia-se o sucesso do cumprimento dos objectivos iniciais deste estudo. É ainda realizada uma súmula de diversos aspectos que necessitam de estudos futuros.

2. ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS: O QUE SÃO, SUAS CAUSAS POSSÍVEIS E SEUS POSSÍVEIS IMPACTOS

Neste capítulo procura-se definir o que são alterações climáticas, as suas causas mais relevantes e suas consequências possíveis mais significativas para a esfera humana.

2.1. Alterações Climáticas: O Que São?

Ao invés do que é geralmente considerado pelo público não especialista, é intrínseco ao clima terrestre sofrer alterações. Os registos geológicos mostram que ao longo da história da Terra o clima global alternou entre períodos quentes (onde predominaram climas tropicais quentes e húmidos em vastas extensões do globo) e períodos glaciais. Estas alterações climáticas foram sempre despoletadas, pelo menos até ao advento da Era Industrial, por um conjunto de fenómenos e processos naturais.

O *estado do tempo* ou as condições meteorológicas para um dado local e período temporal é o estado da atmosfera nesse local e período temporal. O **clima** de um dado local é definido pelo conjunto de eventos meteorológicos registados nesse local (o *estado do tempo* médio para esse local), ou seja a descrição estatística das variáveis meteorológicas, os **meteoros**, durante um período que pode ir de meses a milhões de anos. Deste modo **alteração climática** é uma variação estatisticamente significativa quer no clima médio quer na sua variabilidade, que ocorre durante um período alargado de tempo, da ordem de décadas ou superior. Uma alteração climática ocorre sempre que a temperatura global média da camada inferior da atmosfera (a troposfera) sofre uma modificação acentuada durante um determinado período de tempo significativo, em consequência da alteração do equilíbrio entre a radiação solar absorvida e a radiação emitida pela superfície da Terra no espectro dos infravermelhos; este equilíbrio depende da concentração dos gases com efeito de estufa, assim como do tipo e concentração dos aerossóis, pelo que qualquer alteração nas suas concentrações (e composição global da atmosfera) provocará uma alteração na temperatura média da troposfera (SIAM, 2002). De facto os aerossóis de origem natural (ex.: sal marinho, poeiras de desertos, etc.) e de origem antropogénica (ex.: carbono negro, sulfato não marinho) têm também impactos no controlo clima, reconhecidos pelo IPCC, e de facto, se a influência dos gases de efeito de estufa é preponderante a nível global, à escala regional o efeito radiativo dos aerossóis torna-se muito mais acentuado (Rodrigues, 2001 b). Assim, tanto a alteração nas concentrações dos gases de efeito de estufa como dos aerossóis, provoca mudanças nos balanços de energia entre as várias regiões atmosféricas, com consequentes mudança dos padrões de circulação atmosférica, no zonamento climático do globo, fenómenos extremos, eventos de precipitação, etc. As alterações climáticas tanto podem ser produzidas por processos naturais como, ao que as observações mais recentes indiciam, por acções humanas.

As alterações climáticas podem ser globais ou locais, dependendo da extensão das áreas afectadas pelos fenómenos acima citados e replicação destes mesmos impactos à escala planetária. É muito importante recordar que as alterações climáticas globais afectam sempre os climas locais, podendo levá-los a evoluir segundo sentidos opostos ao da tendência global. Com efeito as alterações climáticas locais dependem não apenas das modificações verificadas a nível global mas também de factores específicos como:

- ❖ a localização geográfica da região – sobretudo em termos de latitude;
- ❖ a proximidade ou afastamento aos oceanos – ou seja, a sua continentalidade;
- ❖ a localização face a grandes cadeias de montanhas;
- ❖ a localização face às grandes correntes oceânicas;
- ❖ a proximidade aos grandes centros poluidores (ex.: Europa Central, Leste dos Estados Unidos);
- ❖ a proximidade a grandes fontes naturais emissoras de aerossóis (ex.: oceanos, superfícies desérticas, vulcões em actividade);
- ❖ as condições microclimáticas locais.

2.2. Alterações Climáticas: Suas Causas

O primeiro factor que influencia o clima terrestre é a existência e composição da sua atmosfera, uma cobertura gasosa que deve a sua existência, estrutura e composição a uma longa evolução controlada pela interacção entre factores de ordem astronómica, geológica e biótica.

Devido à complexidade do sistema atmosférico, é natural que este sofra alterações, derivadas da sua estrutura estocástica e caótica, a que se associa toda uma cascata de sub-sistemas em interdependência e complexas relações de “*feed-back*”, os quais não tendem para uma estabilidade uniforme. Acresce-se que uma atmosfera nunca é um sistema isolado e interage tanto com as forças, influências e fenómenos provenientes do espaço exterior como com os mecanismos do planeta que envolve. Esta complexidade e múltiplas interacções de diversos tipos e a diversas escalas origina alterações climáticas, as quais são uma constante da história da Terra, fazendo parte da variabilidade natural do sistema climático global. Esta variabilidade pode expressar-se em rápidas variações de temperaturas médias, como as registadas nalguns períodos do final da última glaciação², verificando-se, de acordo com registos nos gelos da Groenlândia Central, que o sistema climático global pode sofrer instabilidades abruptas devidas apenas a causas naturais (Marshall, 2001).

O mais importante factor astronómico no controle do clima é a distância ao sol, responsável pela quantidade de energia que atinge a atmosfera e a superfície planetária, da qual depende quase toda a dinâmica de circulação atmosférica. A distância ao sol

² E que, para probabilidades de 60 a 90%, atingem variações de cerca de 5 a 10 °C em apenas algumas décadas.

controla também, de modo relativamente indirecto, a composição da atmosfera e portanto a forma como esta reage a estímulos externos. Tome-se por exemplo o vapor de água que tende a surgir nos planetas vizinhos do sol em fase exclusivamente gasosa, depois em fase gasosa, líquida e sólida, à medida que nos afastamos do Sol, sendo removida da atmosfera nos planetas exteriores, onde ocorre não na atmosfera mas nas “litosferas” destes planetas.

A órbita terrestre influencia o clima na Terra não apenas em termos da sua distância média ao Sol mas também pelas lentas alterações sofridas durante períodos de 20 000 a 400 000 anos, as quais se crêem ser as principais responsáveis astronómicas pela alternância de períodos glaciares e inter-glaciares na história da Terra (SIAM, 2002). O segundo importante factor astronómico de controlo atmosférico são os ciclos de actividade solar, que determinam em grande parte a quantidade de energia que atinge os planetas e portanto a energia disponível para os processos atmosféricos. Outros fenómenos celestes como a oscilação do eixo de rotação da Terra e o trajecto do sistema solar através da galáxia (e consequente interacção com as nuvens de poeiras cósmicas), podem também afectar de modo sensível a quantidade da radiação solar que atinge a atmosfera e a superfície terrestre.

Entre os factores de ordem geológica que afectam as propriedades da atmosfera os mais importantes são (1) a actividade vulcânica, vector principal do processo de desgaseificação planetária e responsável directo pela criação e evolução da atmosfera, assim como pela sua composição e consequentes propriedades de absorção e transmissão de calor e (2) as emissões de poeiras das zonas desérticas e semidesérticas do globo. Uma alteração na taxa de actividade vulcânica pode causar modificações na composição atmosférica (em especial nas concentrações de SO₂ e de aerossóis), o que afecta a sua opacidade à radiação solar e à libertação de calor para o espaço; contudo deve referir-se que o tipo e quantidade de gases e aerossóis que são libertados pelas erupções vulcânicas depende do tipo de erupção em causa. Refira-se por exemplo que, ao nível dos aerossóis, no período de actividade do vulcão oceânico da Serreta, houve uma alta emissão de sulfatos e a quase total ausência de partículas minerais de origem vulcânica (Rodrigues, 2001), emissões essas próximas das da Crista Médio Atlântica a meia distância entre o Faial e o Grupo Ocidental (Rodrigues *et al.*, 2004). Em relação às poeiras de origem litológica, só o deserto do Saara contribui actualmente com cerca de 50% da massa total de aerossóis minerais – entre os quais se incluem os de origem vulcânica – registados, a nível global, na atmosfera (Rodrigues, 2001 b).

Outro factor de ordem geológica também responsável por mudanças climáticas é a alteração, devida à tectónica de placas, na distribuição das massas continentais; isto pode modificar os padrões de circulação oceânica (ex.: fechando as regiões polares às correntes marítimas de origem tropical) e consequentemente a circulação de calor entre as regiões quentes e as regiões polares, podendo por exemplo criar condições para a formação de extensas calotes polares e o estabelecimento subsequente de períodos glaciares. A deriva continental é também responsável pela formação de cadeias de montanhas, as quais modificam a circulação atmosférica ao funcionarem como barreiras à circulação das massas de ar. Se estas cadeias forem de pequena expressão geográfica o seu impacto é significativo apenas a nível regional, mas se forem de grande amplitude o seu efeito sobre a circulação atmosférica pode ter repercussões a nível global; este é o

caso dos Himalaia que controlam todo o regime de monções do Oceano Índico e Ásia, influenciando o clima global do planeta (Tarling, 1997).

Finalmente, e no caso do planeta Terra, a acção da biosfera tem um papel fundamental no controlo atmosférico, ao nível da sua composição, regulando a concentração de gases como o vapor de água, o CO₂ e O₂³, vitais no controlo da capacidade da atmosfera em transmitir, acumular e libertar calor, e portanto na regulação térmica do planeta. Uma alteração drástica nos ecossistemas (ex.: extensão geográfica e/ou vitalidade) pode modificar o equilíbrio regulador da biosfera sobre estes gases, causando alterações no comportamento térmico da atmosfera, com consequentes reflexos no clima terrestre.

Além destes processos, acontecimentos acidentais podem também estar na origem de possíveis alterações climáticas muito localizadas no tempo, como é por exemplo o caso do possível impacto meteorítico do final do Cretácico que se presume haja ocasionado uma brusca alteração climática responsável pelas extinções em massa dessa época (Alvarez *et al.* 1980; Emiliani *et al.*, 1981).

Os aspectos atrás abordados referem-se às alterações naturais do sistema climático terrestre, sejam elas produzidas pela própria complexidade e funcionamento do sistema em si, por efeitos astronómicos, geodinâmicos, biológicos ou até eventos acidentais. Contudo recentemente a actividade humana e o seu significativo impacto a vários níveis do funcionamento do planeta, simultânea com o registo de uma muito rápida alteração na composição química da atmosfera directamente associada a fontes antrópicas (ex.: o incremento das concentrações dos compostos gasosos e aerossóis de enxofre), a qual coincide temporalmente com mudanças (1) nos valores médios de variáveis atmosféricas como a precipitação e temperaturas, (2) nível do mar, (3) extensão das calotes polares e glaciares, sugere a possibilidade da espécie humana estar activamente a interferir nos mecanismos naturais de evolução e regulação atmosférica, provocando, ou pelo menos potenciando o desenvolvimento de alterações climáticas globais.

De acordo com o IPCC (2001) e Working Group I do IPCC (2001a e b), as alterações que se verificam são as seguintes:

- Forte tendência de aumento das temperaturas médias globais. A temperatura média do ar à superfície subiu cerca de 0,6 °C durante o século XX; no Hemisfério Norte o aumento secular da temperatura foi mui provavelmente o mais elevado dos últimos 1 000 anos;
- Diminuição na frequência das temperaturas muito baixas e leve subida na frequência das temperaturas muito altas;
- Em média, nas zonas continentais, as temperaturas mínimas nocturnas subiram cerca de 0,2 °C por década (cerca de 2 vezes a subida nas temperaturas máximas diurnas), originando uma extensão da época sem gelos em muitas regiões de médias e altas latitudes;
- Redução de cerca de 10% na cobertura de gelos/neves desde a década de 1960, com redução em cerca de 2 semanas do período de congelamento da

³ Embora, no caso do oxigénio, seja o seu “parente” ozono (O₃) quem tem o papel activo neste controlo.

superfície de lagos e rios nas altas e médias latitudes do Hemisfério Norte durante o século XX;

- Redução dos períodos e intensidades de quedas de neve e consequente redução das zonas glaciares continentais e das calotes polares, havendo um recuo generalizado dos glaciares de montanha nas zonas não polares durante o século XX;
- A cobertura de gelos oceânicos durante a Primavera e Verão diminuiu cerca de 10 a 15% desde 1950, com possível redução de cerca 40% da espessura da calote polar ártica durante o fim do Verão e início do Outono nas últimas décadas;
- Maior frequência dos episódios do El Niño;
- Subida de 2 a 4% dos eventos de precipitações intensas nas médias e altas latitudes do Hemisfério Norte, sendo muito provável que durante o século XX a precipitação tenha subido 0,5 a 1% por década nas médias a altas latitudes do Hemisfério Norte e decrescido 0,3% por década nas regiões subtropicais do mesmo Hemisfério;
- Incremento do nível do mar e da temperatura da superfície do mar. O nível médio global do mar subiu de 0,1 a 0,2 m durante o século XX;
- O calor armazenado nos oceanos subiu desde a década de 1950, verificando-se que a subida da temperatura da superfície do mar é cerca de metade da registada para o ar à superfície dos continentes;
- Alterações nos regimes de caudais dos rios, frequências de inundações e transportes sedimentares e de nutrientes, em particular nas regiões mais áridas;
- Nalgumas regiões – ex.: África – ocorreu um aumento da frequência e intensidade dos episódios de seca.

Aparentemente as alterações a que actualmente se assiste parecem ser muito mais intensas do que as registadas nos últimos milénios e embora de per si isto não aponte forçosamente para uma acção antropogénica, estas parecem terem sido incrementadas em larga medida após o início da Revolução Industrial, nomeadamente o aquecimento global (Fig. 2).

A favor da hipótese da interferência humana nos processos de alteração climática recentes estão as seguintes observações (Working Group I do IPCC, 2001 a):

- Durante o último milénio antes da Revolução Industrial a composição atmosférica em gases de efeito de estufa manteve-se relativamente constante (no caso do CO₂ atmosférico $\approx 280 \pm 10$ ppm). Após o início da Era Industrial estes gases registaram um aumento das suas concentrações quer por efeitos directos quer indirectos das actividades humanas (Quadros I e II):
 - **Para o CO₂** – subidas de 31%⁴, com as taxas de subida do século XX a ultrapassar todos os valores dos últimos 20 000 anos, cifrando-se desde 1980 nos 0,4% ao ano;

⁴ Ou seja até 367 ppm em 1998.

- **Para o CH₄** – subidas de cerca de 150%, desde o valor de base de 1 060 ppb, atingindo em 1998 os 1 745 ppb, embora se registre nos últimos anos um declínio, com grandes variações inter-anuais, na taxa de crescimento da concentração;
- **Para o N₂O** – um aumento de cerca 16% em relação a 1750, verificando-se uma subida actual de 0,25% ao ano (valores de 1980 a 1998).

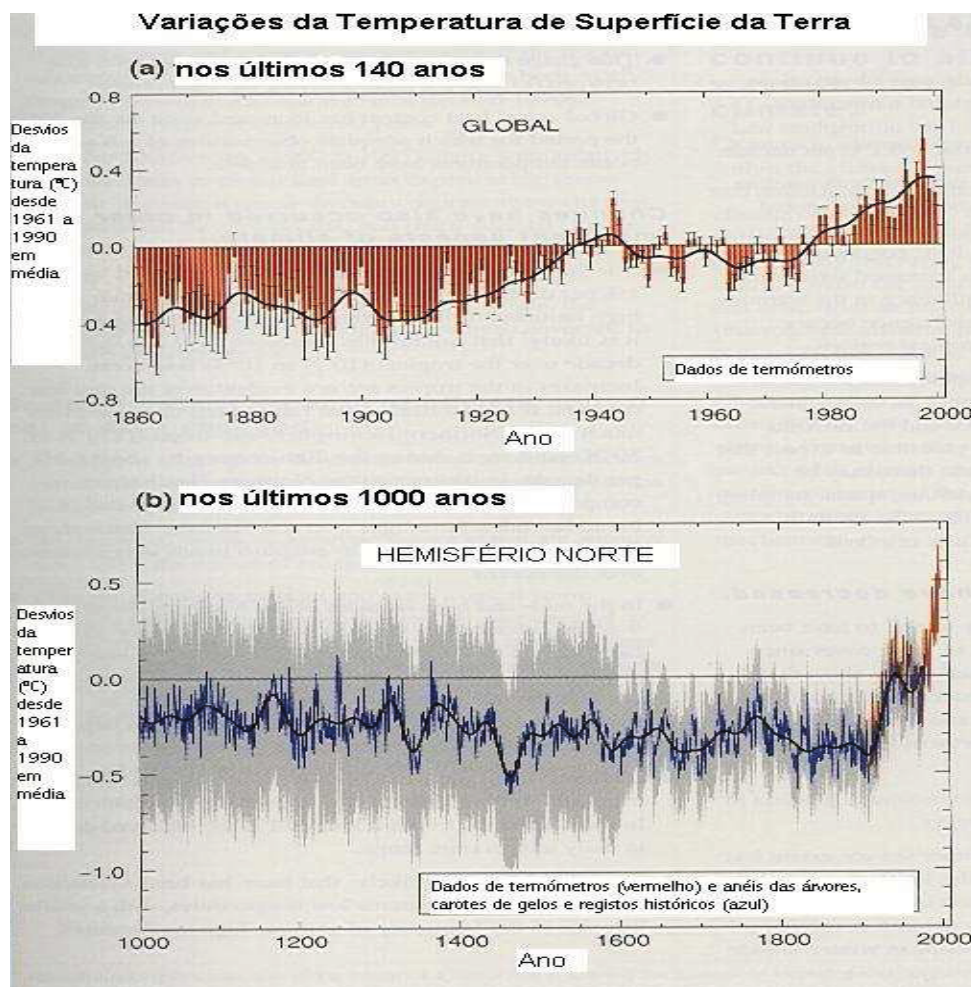


Figura 2 – Evolução da Temperatura de Superfície Terrestre nos Últimos 140 anos e nos Últimos 1 000 anos (Working Group I do IPCC, 2001 c)

- A actual concentração de CO₂ e CH₄ na atmosfera parece ser a mais elevada ao longo dos últimos 420 000 anos, com 66 a 90% de probabilidade de, para o CO₂, ser a maior nos últimos 20 Ma; a actual concentração de N₂O parece ser a mais elevada dos últimos 1 000 anos;
- A composição isotópica do CO₂ atmosférico e o decréscimo observado da concentração de O₂ mostram que o aumento do CO₂ se deve predominantemente à oxidação do carbono orgânico pela combustão de combustíveis fósseis e à alteração dos padrões de uso do solo, em particular pela desflorestação;

- Embora o CH₄ seja um gás cujas fontes produtivas são tanto humanas como naturais, verifica-se que um pouco mais de metade das actuais fontes de emissão de CH₄ são antropogénicas;
- A abundância do CO no Hemisfério Norte aumentou na segunda metade do século XX;
- O sincronismo entre o início da Era Industrial e o início do incremento nas taxas de concentração na atmosfera dos gases de efeito de estufa face à anterior evolução natural da composição atmosférica;
- Apesar da actividade vulcânica de 1880 a 1920 e de 1960 a 1991 gerar uma maior concentração de aerossóis na estratosfera, causando uma diminuição da temperatura atmosférica à superfície do planeta, verifica-se uma subida global da temperatura;
- Ausência de condicionalismos de ordem natural, excepto os já citados de acção vulcânica, que sejam causadores únicos da evolução actual das concentrações dos gases de efeito de estufa;
- Existência duma tendência de subida da temperatura atmosférica global que a partir do dealbar da Era Industrial parece sofrer uma aceleração que se afasta da tendência natural de subida associada à evolução dentro de um período interglaciário, registada até essa altura.

Quadro I – Concentrações de Gases de Efeito de Estufa Susceptíveis a Alterações Devido a Actividades Humanas (Working Group I do IPCC 2001 a)

	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CFC-11	HFC-23	CF ₄
Concentração pré industrial	≈ 280 ppm	≈ 700 ppb	≈ 270 ppb	0	0	40 ppt
Concentração em 1998	365 ppm	1 745 ppb	314 ppb	268 ppt	14 ppt	80 ppt
Concentração em 2005, para a ilha Terceira (1)	375 ppm	1 830 ppb	320 ppb	35 ppt	--	--
Taxa de variação da concentração *	1,5 ppm/ano	7,0 ppb/ano	0,8 ppb/ano	- 1,4 ppt/ano	0,55 ppt/ano	1 ppt/ano
Semi-vida na atmosfera (anos)	5 a 200	12	114	45	260	> 50 000

(1) Felix Rodrigues, comunicação oral, 2005; *calculada para o período entre 1990 e 1998

Quadro II – Balanço Global de CO₂ (em PgC/ano) Baseado em Medições Atmosféricas de CO₂ e O₂ (Working Group I do IPCC 2001 a)

	1980 a 1989	1990 a 1999
Incremento atmosférico	3,3 ± 0,1	3,2 ± 0,1
Emissões antrópicas	5,5 ± 0,3	6,3 ± 0,4
Fluxo oceano-atmosfera	- 2,0 ± 0,5	- 1,7 ± 0,5
Fluxo terra-atmosfera	-0,2 ± 0,6	- 1,4 ± 0,7

*os valores positivos indicam fluxos para a atmosfera; os negativos remoções da atmosfera

Além das observações referidas a modelação realizada pelas várias equipas de trabalho do IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) aponta para que as alterações climáticas actualmente verificadas tenham forte contribuição antrópica. As actividades humanas que parecem ter mais impacto na alteração da composição e, de forma mais ou menos directa, no comportamento térmico da atmosfera, são a queima de

combustíveis fósseis, que origina a emissão de aerossóis e gases designados por “*gases de efeito de estufa*”⁵, a desflorestação e outras alterações do uso dos solos.

O **efeito de estufa** consiste em tornar a atmosfera opaca à radiação infravermelha, permitindo que a radiação solar de outros comprimentos de onda penetrem a atmosfera, mas que toda a radiação da zona do infravermelho, emitida pela superfície da Terra (por interacção com a radiação solar que a atinge) seja retida na atmosfera, provocando um aquecimento da mesma. Esse efeito de estufa é o que permite à Terra ter condições de habitabilidade tão favoráveis mas que, em casos de eficiência excessiva, torne planetas autênticos fornos, como é o caso de Vénus. Em condições naturais, a concentração dos gases de efeito de estufa na atmosfera terrestre permitiu a subida global da temperatura de superfície de -18°C (a que ocorreria se não existisse atmosfera) para a temperatura média de 14°C (Working Group I do IPCC, 2001 c). A concentração dos gases de efeito de estufa é, portanto, o factor mais importante de regulação do clima e ocorrência de alterações climáticas, embora os factores astronómicos, geológicos (ex.: alteração da geometria dos oceanos e associada circulação oceânica, devido à tectónica de placas), biológicos e variabilidade intrínseca do sistema atmosférico desempenhem também um papel importante na génese destas alterações. A modificação da concentração dos gases de efeito de estufa tanto se pode dar no sentido da sua diminuição, o que favorece as condições para o arrefecimento generalizado do clima, como no sentido oposto (Working Group I do IPCC, 2001 c).

Desde 1750 que a concentração de CO_2 tem aumentado na atmosfera, e estendendo o período de observação aos registos paleo-climáticos dos últimos 420 mil anos⁶, verifica-se que as concentrações actuais de CO_2 são as mais elevadas do registo, havendo indícios de sejam as mais elevadas dos últimos 20 Ma (IPCC, 1995; Working Group I do IPCC, 2001 a). Dos registos geológicos e astronómicos não se deduzem quaisquer causas naturais conhecidas que possam justificar a totalidade desse aumento; em contrapartida, desde 1750 houve um aumento crescente da queima de combustíveis fósseis e da desflorestação, e os estudos do SIAM (2001) indiciam que o aumento da concentração de CO_2 se deve largamente à queima de combustíveis fósseis. Esta tendência evolutiva é partilhada pelos restantes *gases de efeito de estufa*. Alguns cientistas advogam que outros destes gases podem ter um papel muito importante, senão

⁵ Gases que emitem e absorvem radiação infravermelha, de que os mais importantes são: vapor de água (o mais importante), CO_2 (o principal composto cuja concentração na atmosfera está a ser incrementada pelas actividades humanas), CH_4 , N_2O , CFC's (clorofluorcarbonos), HFC's (hidrofluorcarbonos), PFC's (perfluorcarbonos), SF_6 (hexafluoreto de enxofre) e O_3 . Os potenciais de efeito de estufa de cada um destes gases é, segundo Albritton et al. (1996):

Designação/Fórmula Química	Potencial de estufa	Tempo de residência (anos)
Dióxido de carbono / CO_2	1	150
Metano / CH_4	25	10
Óxido nitroso / N_2O	320	120
Hidrofluorcarbonetos / HFC's	93 – 12 000	1,5 – 1 700
Perfluorcarbonetos / PFC's	4 000 – 12 500	50 – 50 000
Hexafluoreto de enxofre / SF_6	24 900	3 200

⁶ Pelo estudo, por exemplo, de bolhas de ar retidas nos gelos das calotes glaciares à data da sua deposição, análise dos anéis de troncos de árvores, características dos corais e outros dados paleoclimáticos (Working Group I do IPCC, 2001 a).

o mais importante no aquecimento registado⁷, fazendo notar que o aquecimento provocado pelo metano e CFC's (Fig. 3) teve, desde 1950 um mais rápido incremento (Fig. 4) que o aquecimento gerado pelo CO₂ (Hansen, 2000).

A este efeito antropogénico sobrepõe-se a tendência evolutiva originada pelos factores naturais e que é mal conhecida, embora pareça estar a ficar cada vez mais subordinada ao impacto das actividades humanas. A favor desta teoria estão os resultados da maioria das modelações climáticas para o século XX, as quais indiciam que as tendências de subida da temperatura registadas não se podem justificar apenas por processos naturais.

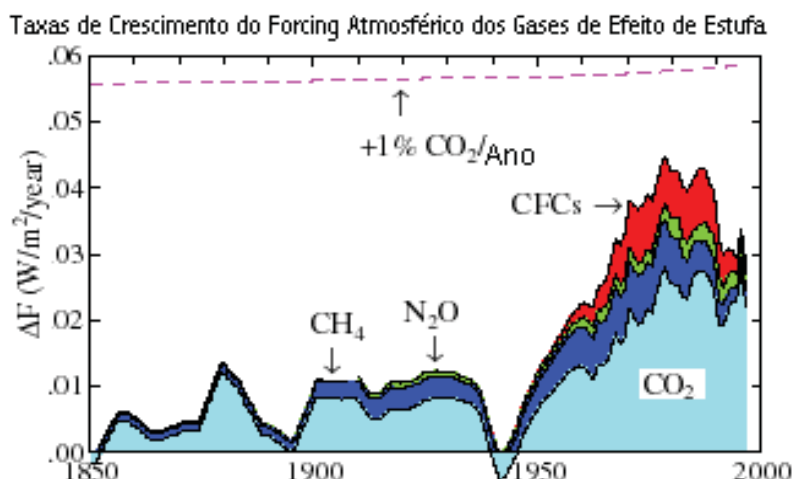


Figura 3 – Taxas de Evolução do Forcing Atmosférico dos Gases de Efeito de Estufa (NASA, 2000 a)

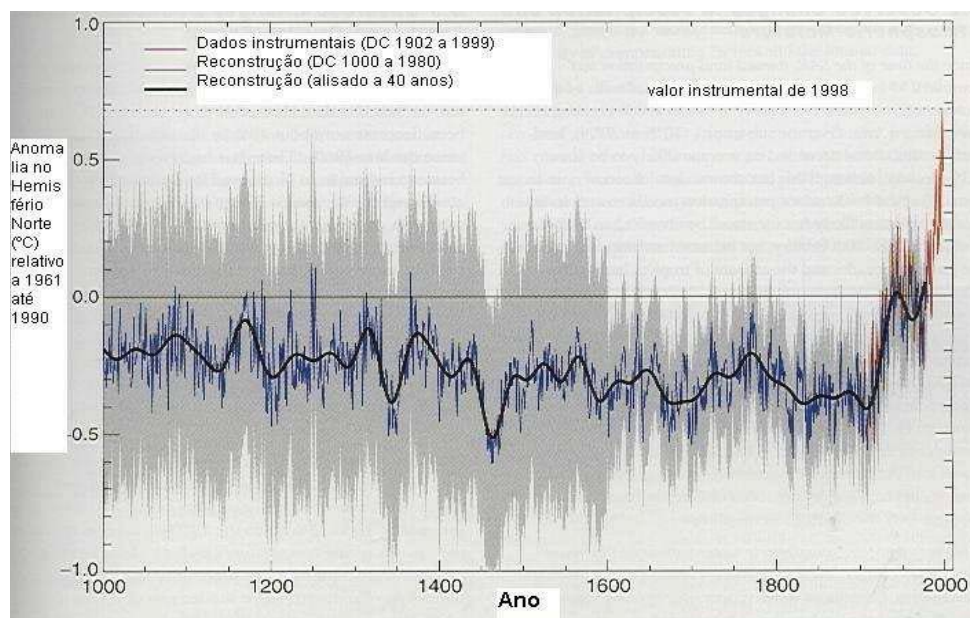


Figura 4 - Reconstrução da Evolução das Temperaturas no Hemisfério Norte do Último Milénio (Working Group I do IPCC, 2001 c)

⁷ Que desde 1975 foi de 0,5 °C (Hansen, 2000 in NASA, 2000 a).

Os resultados dos modelos climáticos globais apenas mostram significativa consistência com as observações instrumentais⁸ quando se acopla ao sistema a acção humana. Só então é possível reproduzir a evolução das concentrações dos gases de efeito de estufa, aerossóis e o “forcing” atmosférico que estes compostos induzem na subida das temperaturas troposféricas e de superfície, em conformidade com as observações dos últimos 30 anos. Quando o factor humano é retirado da modelação, os resultados têm desvios face às observações, indiciando que os factores naturais, de *per si*, não explicam todas as alterações actualmente observadas (Working Group I do IPCC, 2001 a); as mais recentes estimativas da acção da variabilidade interna dos sistemas climáticos mostram que a probabilidade do aquecimento registado nos últimos 100 se dever só a à variabilidade natural é apenas de 1 a 10% (Working Group I do IPCC, 2001 a). Desde modo, as mudanças actualmente observadas são muito provavelmente devidas ao efeito acoplado da variabilidade do sistema natural e da acção humana (Working Group I do IPCC, 2001 a), havendo 60 a 90% de probabilidade do aquecimento global registado nos últimos 50 anos se dever ao incremento da concentração dos gases de efeito de estufa na atmosfera de origem antropogénica.

Deve contudo sublinhar-se que os impactos das acções antropogénicas são complexos e, no caso da queima dos combustíveis fósseis, assim como outras actividades humanas, são produzidos aerossóis, no geral com curtos tempos de vida, que na sua maioria tendem a reduzir o efeito de estufa, pelo que influência antrópica resulta mais uma vez dum balanço entre os componentes das emissões que promovem o incremento do efeito de estufa e os que promovem o seu decréscimo. É de assinalar que ao nível local podem existir desvios ao balanço energético global resultantes da mistura gases/aerossóis devido, entre outras razões, ao facto de que a distribuição espacial planetária do CO₂ e CH₄, os principais gases produtores do efeito de estufa, divergir da dos aerossóis de sulfatos, que produzem efeito radiativo negativo. Assim, se o CO₂ e CH₄ tendem a deslocar-se para as calotes polares, os aerossóis de sulfatos tendem a distribuir-se numa faixa de latitudes que engloba a Europa Central, o Leste dos Estados Unidos e o Sul da China, apresentando estes aerossóis uma origem antropogénica maioritária (Chin *et al.*, 2000). Este tipo de aerossol afecta o balanço radiativo da atmosfera mas também as propriedades físico-químicas das nuvens e propicia reacções heterogéneas de superfície, alterando a concentração de algumas espécies químicas na atmosfera (Rodrigues, 2001), o que ajuda a explicar porque, por exemplo, nos Açores se registou ao longo do último século uma tendência de descida da temperatura, em vez da tendência global de subida.

Concluindo, as causas das alterações climáticas são de origem natural ou antropogénica. Os processos naturais que podem originar alterações climáticas incluem: (1) ciclos e fenómenos astronómicos, (2) alteração global da taxa de actividade vulcânica, (3) ciclos de glaciação, (4) variação na distribuição das massas continentais e por conseguinte na geometria dos oceanos, com consequentes impactos no padrão das

⁸ Subida da temperatura global, aumento da amplitude térmica continente-oceano, redução das calotes polares oceánicas, recuo de glaciares e aumento das precipitações nas médias e altas latitudes no Hemisfério Norte.

correntes oceânicas e por “*feed-back*” no padrão de correntes atmosféricas, (5) alterações fundamentais nos ecossistemas, (6) eventos cósmicos ocasionais. Os processos antropogénicos com maior capacidade para interferir no clima são: (1) emissões de gases como o CO₂, SO₂, NH₄, NO_x e aerossóis, (2) desflorestação, (3) emissões térmicas.

2.3. Alterações Climáticas: Seus Possíveis Impactos

As alterações climáticas, resultantes quer de oscilações naturais quer, nos últimos 150 a 300 anos pela actividade humana, tendem a causar um conjunto de impactos sobre o meio físico e biológico, a partir basicamente de quatro vectores (Working Group I do IPCC, 2001 a):

1. Subida da temperatura média global;
2. Alteração nos padrões de circulação oceânica e atmosférica (afectando as variabilidades espaciais e temporais de precipitações, temperaturas e eventos extremos), gerando a alteração persistente dos padrões climáticos regionais;
3. Subida global do nível do mar;
4. Subida da temperatura média das camadas superiores dos oceanos.

A evolução actualmente observada no clima da Terra mostra uma tendência para a subida das temperaturas médias de superfície tanto dos continentes como dos oceanos e da baixa troposfera (associada a uma redução na temperatura média da estratosfera), em paralelo com um aumento da concentração dos gases de efeito de estufa e aerossóis na baixa atmosfera (Working Group I do IPCC, 2001 a). Os registos instrumentais de temperatura médias da superfície do globo apontam para um aumento sensível desde os meados do século XIX, que durante o século XX atingiu os $0,6 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$, para um intervalo de confiança de 95% (Working Group I do IPCC, 2001 a), havendo neste último século dois períodos de aquecimento, um entre 1910 e 1945 e outro desde 1976, com uma subida média da temperatura de cerca de $0,15^\circ \text{ C/década}$, com padrões de aquecimento regional distintos, pressupondo um aquecimento algo diferente nos dois períodos. Este aquecimento deu-se com maior incidência nas zonas continentais, sendo o dobro para os continentes face às regiões oceânicas. Ocorre também uma redução generalizada na amplitude térmica diurna nos continentes, onde o aumento da temperatura mínima é no geral duas vezes superior ao das temperaturas máximas, coincidente com o aumento global⁹ da cobertura nebulosa, precipitação e teor de humidade total na baixa atmosfera. Ao mesmo tempo o teor de calor dos oceanos aumentou significativamente na faixa dos 300 metros superficiais desde os finais da década de 1950, apresentando uma taxa de subida de $0,04 \text{ }^\circ\text{C/década}$.

Resultados de simulação de modelos climáticos globais (GCMs) acoplando modelos de circulação atmosférica e oceânica prevêm os seguintes impactos térmicos (Working Group II do IPCC, 2001):

⁹ Embora, naturalmente, as situações possam, a nível local, ser radicalmente distintas.

- Aumento da temperatura média **global** da Terra entre 1,4 e 5,8 °C (Figs. 5 e 6), até ao ano 2100, subida esta muito superior à verificada no século XX e possivelmente nos últimos 10 000 anos. Para uma probabilidade de 50% esta subida cifra-se nos 2° C enquanto para 5% de probabilidade, a subida é da ordem dos 4,7 °C, para um intervalo de confiança de cerca de 90% (Titus e Narayanan, 1996);
- Aquecimento mais acentuado dos continentais face à média global do planeta, podendo registar-se subidas de mais de 40% para a Ásia do Norte;
- Aumento de 0,2 a 3 °C para as décadas de 2050 a 2080, nas ilhas do Atlântico, Pacífico e Caraíbas (Hay, 2000), o mesmo se verificando para as temperaturas estivais e inverniais do Hemisfério Norte;

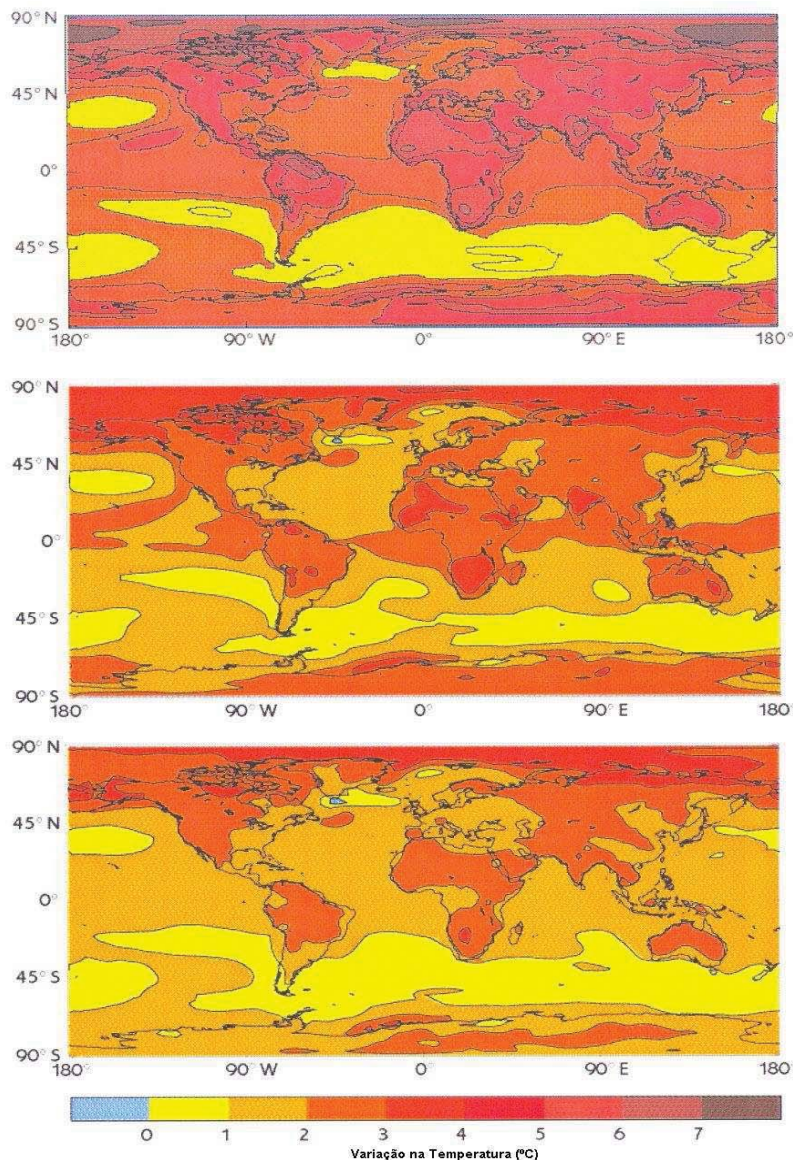


Figura 5 – Cenários de Alteração da Temperatura Média Anual para o ano 2080 para os 3 Cenários Base de Emissões; topo – sem redução de emissões; meio – estabilização da emissão de CO₂ a 750 ppm; baixo – estabilização da emissão de CO₂ a 550 ppm (Working Group II do IPCC, 2001)

- Aumento mais pronunciado nas temperaturas médias anuais mínimas face às máximas;
- Aumento da frequência das temperaturas extremas durante o Verão (projeções para as décadas de 2050 a 2080), com consequente aumento da probabilidade de stress térmico;
- Redução de 0,3 a 0,7 °C da amplitude térmica global diurna (Hay e Kaluwin, 1993).

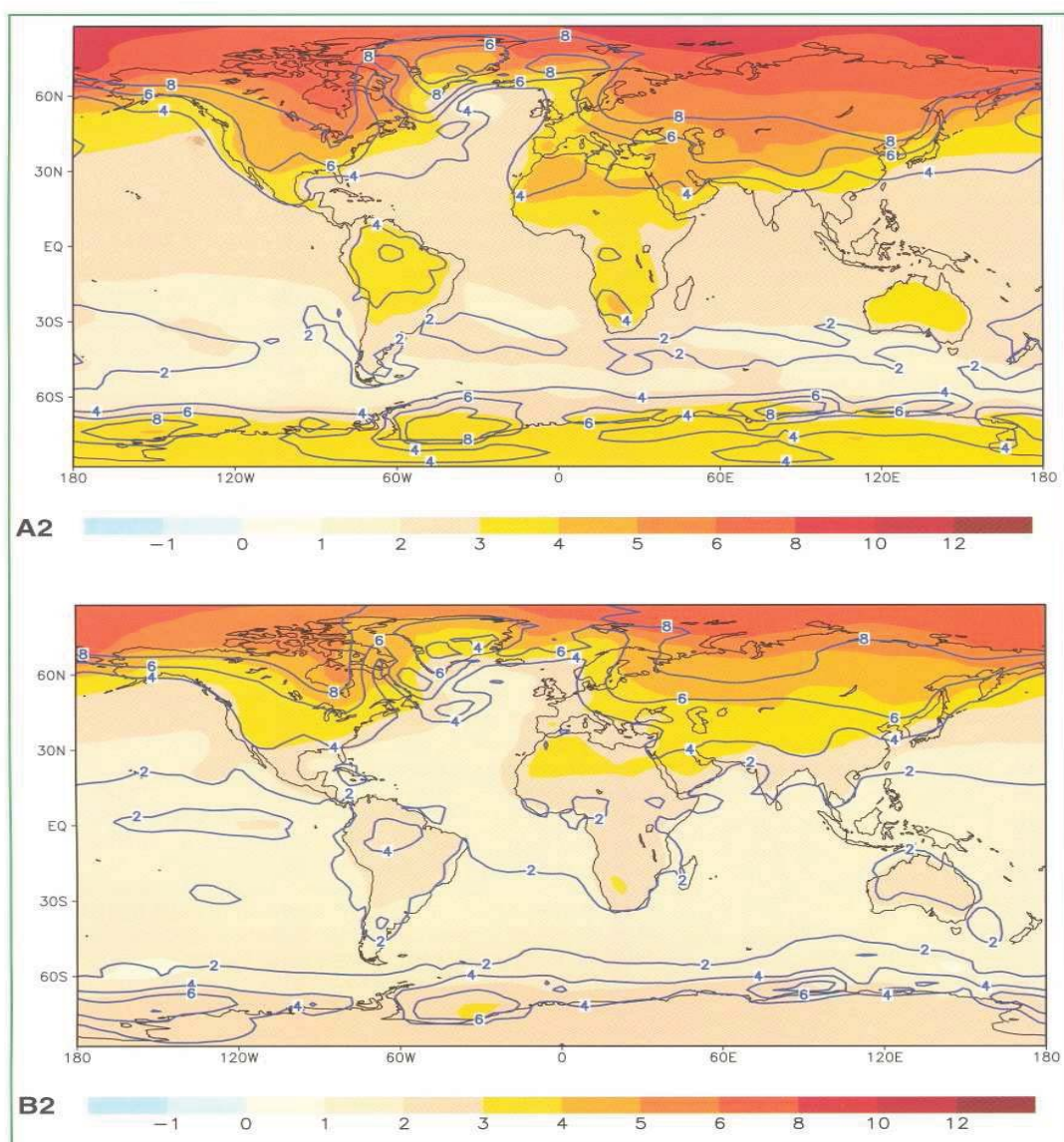


Figura 6 – Variação Média Anual da Temperatura (em °C) para os cenários SRES (topo: cenário A2; base: cenário B2) para o Período de 2071 a 2100 em relação a 1961-1990, a Partir dos resultados dos Modelos Climáticos Globais (Working Group II do IPCC, 2001)

Os **impactos da subida da temperatura atmosférica** nos recursos hídricos podem ser os seguintes (Sherman, 1998):

1) **alteração das taxas de evaporação a partir de lagos e outros reservatórios e das taxas de evapotranspiração do coberto vegetal** – o que, acoplado com as alterações dos regimes de precipitação terá impactos sobre ecossistemas, consumos humanos, agricultura (ex.: aumento das necessidades em água ou mudança nos tipos de culturas e processos de cultivo), coberto vegetal e erosão dos solos;

2) **potencial redução do escoamento superficial** – e conseqüente redução do volume de água para infiltração de fundo, o que irá afectar a recarga de aquíferos;

3) **potencial alteração das taxas da recarga dos aquíferos** – todos os aspectos anteriores influenciam a recarga, ao agirem sobre os factores que controlam a infiltração e os volumes de recarga. Uma alteração na recarga de aquíferos modificará a quantidade dos recursos hídricos disponíveis para consumo humano e dos ecossistemas, e talvez a sua qualidade.

Além das temperaturas, as observações existentes parecem indiciar uma alteração nos padrões de circulação atmosférica, exemplificadas pelo comportamento incomum do El Niño desde meados da década de 70, quando comparado com os 100 anos anteriores, no que se refere sobretudo ao aumento da frequência, persistência e intensidade do fenómeno (Working Group I do IPCC, 2001 a).

Os impactos provocados pelas alterações dos padrões de circulação atmosférica¹⁰ são vastos, implicando:

- Alterações na acção do El Niño, La Niña e sua correspondente atlântica – a North Atlantic Oscillation (NAO) and Arctic Oscillation (AO) – alterando a frequência, tipo e/ou intensidade dos eventos extremos¹¹ (ex.: alguns modelos climáticos prevêem o alargamento da área de ocorrência de ciclones e tufões, sobretudo na área do Pacífico), em especial as precipitações médias e máximas associadas a ciclones e tempestades tropicais
- Subida da precipitação global, registando-se, na 2ª metade do século XXI, as maiores subidas nas altas e médias latitudes do hemisfério Norte e na Antárctida e as maiores descidas nas baixas latitudes;
- Alteração da distribuição geográfica das actuais zonas climáticas;
- Alteração na distribuição geográfica dos biotas associados;
- Alteração a nível local nos tipos de precipitação (convectiva, frontal, etc.);
- Alterações na intensidade, duração e frequência dos eventos de precipitação, a subida do número de eventos de precipitação intensa e aumento dos períodos de seca nas épocas de Verão;
- Alterações na sazonalidade dos regimes de precipitação;
- Modificação das condições de temperatura (e conseqüente evapotranspiração) dos climas locais;

¹⁰ Que afectam temperatura, ventos e precipitação.

¹¹ Extremos térmicos, precipitações intensas, ciclones e outras tempestades subtropicais ou tropicais, cheias, secas, etc.

- Alteração das correntes oceânicas actuais.

Também a precipitação nas altas e médias latitudes do Hemisfério Norte tem sofrido um acréscimo, com 90 a 99% de probabilidade de ocorrência de incrementos da ordem dos 0,5 a 1% por década; em contrapartida nos sub-tropicais a precipitação reduziu-se em média 0,3% por década¹², enquanto nos trópicos ocorre uma subida da precipitação de 0,2 a 0,3% por década (Working Group I do IPCC, 2001 a). Coincidente com estas alterações, regista-se nos últimos 25 anos uma subida do teor total troposférico de água, consistente com as subidas da temperatura troposférica e com a hipótese dum ciclo hidrológico acelerado, daí podendo resultar a ocorrência de eventos extremos de maior intensidade nas áreas que registem incrementos de precipitação.

Os **impactos sobre os recursos hídricos provocados pela alteração dos padrões de precipitação** (Fig. 7) são os seguintes (Sherman, 1998; Working Group I do IPCC, 2001 c); Working Group II do IPCC, 2001; Titus e Narayanan, 1996; EPA, 1998; Comissão Nacional para as Alterações Climáticas, 2001; IPCC, 2001b); Sear *et al.*, 2001):

1) **Mudanças na variabilidade diária e interanual da precipitação** – o que inclui a alteração na frequência, duração média e intensidade dos eventos de precipitação, e causa alterações: (1) do stress sobre os recursos hídricos entre eventos de precipitação; (2) dos valores do escoamento de pico; (3) na frequência e intensidade das inundações, deslizamento de terras e erosão;

2) **Mudanças no padrão sazonal de precipitações** – geram alterações: (1) na duração da estação húmida, (2) teores de humidade dos solos ao início do ano hidrológico; (3) regimes de escoamento dos rios; (4) volumes e extensão dos períodos de recarga, com consequentes mudanças nos volumes extraíveis de água e na sua qualidade; (5) possível alteração da frequência e intensidade das tempestades tropicais, afectando a recarga dos aquíferos;

3) **Mudanças na frequência e intensidade de eventos comuns e extremos (ex.: cheias e secas, eventos de muito altas ou muito baixas temperaturas, chuvas intensas, ventos concentrados¹³, tempestades tropicais)** – geram alterações: (1) no stress sazonal sobre os recursos hídricos, (2) no impacto sobre a recarga, em particular se fora da época húmida; (3) das zonas de inundações (área e distribuição); (4) na quantidade/qualidade dos recursos hídricos; (5) no stress sobre agricultura, com efeitos de qualidade e quantidade nas águas tanto de superfície como subterrâneas. Refira-se que, no estado actual dos conhecimentos, está ainda mal definida a tendência evolutiva da intensidade e frequência de tempestades tropicais, havendo indícios de que possa aumentar a sua intensidade (pode ocorrer um incremento de até 20% na força dos ventos, desconhecendo-se a evolução dos valores de precipitação);

¹² Por vezes associando-se a um menor número de dias de chuva mas com maiores intensidades por evento de precipitação.

¹³ Que por sua vez tendem a originar episódios mais de inundações, deslizamento de terras e erosão.

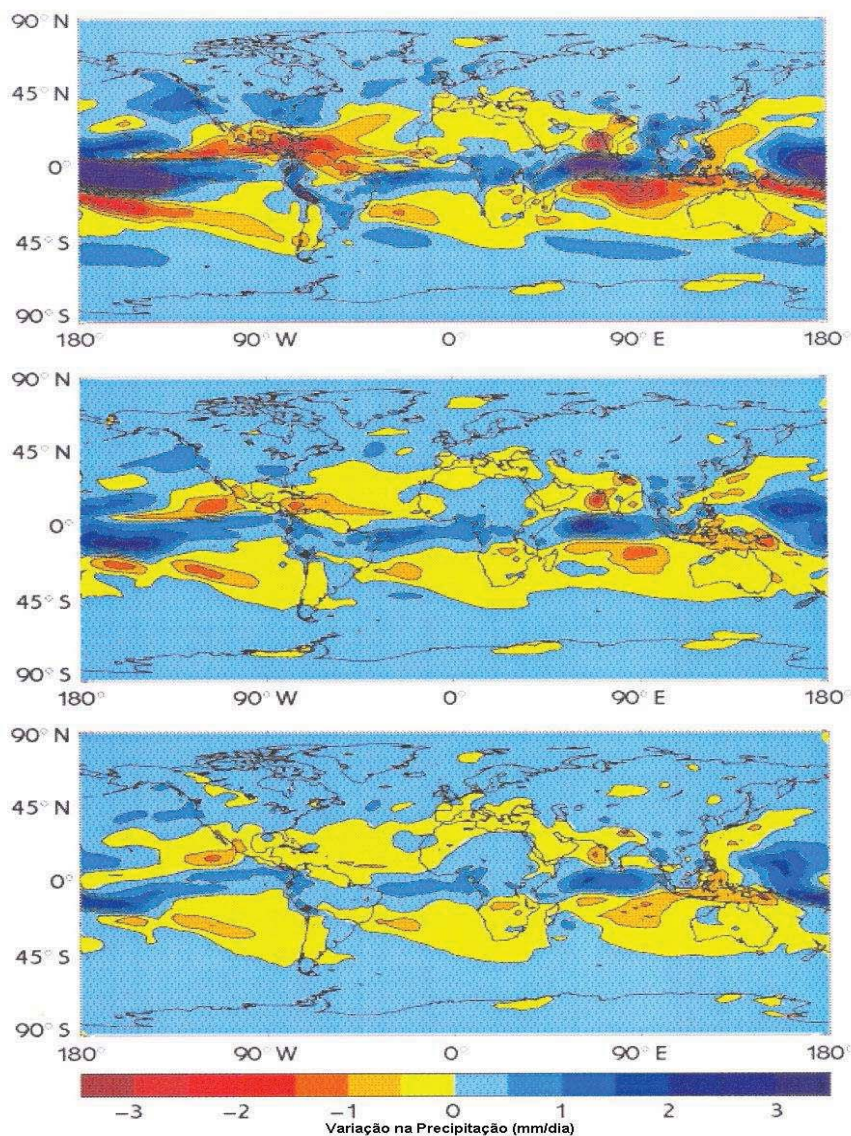


Figura 7 - Cenários de Alteração da Precipitação Média Anual para o ano 2080 para os 3 Cenários Base de Emissões; topo – sem redução de emissões; meio – estabilização da emissão de CO₂ a 750 ppm; baixo – estabilização da emissão de CO₂ a 550 ppm (Working Group II do IPCC, 2001)

4) **Mudanças nos padrões espaciais de precipitação** – geram alterações: (1) na distribuição de zonas de déficit e de excedentes hídricos das bacias hidrográficas, com consequentes alterações nos regimes de escoamento superficial (Fig. 8) e infra-estruturas de abastecimento; (2) na distribuição geográfica de núcleos de condensação de nuvens.



Alterações projectadas no escoamento médio anual para 2080, em relação ao escoamento médio para 1961-1990, que segue aprox. as alterações projectadas para a precipitação. A variação do escoamento é calculada por um modelo hidrológico, usando os inputs de duas versões dum modelo atmosfera-oceano (AOGCM), para 1% de aumento/ano de CO₂ na atmosfera. a) média conjunta HadCM2, b) HadCM3

Figura 8 - Cenários de Alteração do Escoamento Médio Anual no ano 2080 Segundo os Resultados de Dois Modelos Climáticos Globais do Hadley Center; a – HadCM2 média global e b – HadCM3 (IPCC, 2001 b)

As previsões de futuros impactos nos ecossistemas glaciares devidos ao aquecimento da atmosfera, e com potencial para afectar os recursos hídricos, são (Working Group II do IPCC, 2001):

- Redução dos períodos e intensidades médias de precipitação de neve (variável de local para local, havendo regiões onde esta precipitação aumentará);
- Diminuição global das áreas cobertas por neves, glaciares, calotes oceânicas e calotes glaciares continentais, assim como dos volumes de gelo nos cursos de água, lagos e mares;
- Diminuição da espessura das calotes glaciares da Antártida e Gronelândia, com o aumento induzido do nível médio global do mar e inundação de ilhas e zonas costeiras. Está ainda sujeito a grande discussão qual o efeito deste degelo no transporte de calor desde os trópicos até às latitudes boreais, dado que, com o colapso da Corrente do Golfo (um dos efeitos expectáveis deste

degelo), e apesar do aquecimento global, se poderia instalar uma nova era glacial. Com a instalação desta idade dos gelos haveria uma remoção das águas para calotes de gelos, o que poderia originar uma redução da subida do nível do mar. Também discutíveis, segundo alguns autores (cf. NASA, 2000 b) e Comissão Europeia, 1997), são as inferências retiradas das observações instrumentais dos degelos das calotes oceânica e continental da Antártida, quanto à importância da influência que o degelo destas calotes específicas desempenha na subida global do nível do mar.

As alterações climáticas provocam como impactos sobre o meio oceânico: (1) alterações da temperatura média de superfície do mar (aumento da temperatura se for aquecimento atmosférico global (Sear *et al.*, 2001)); (2) alteração na salinidade e alcalinidade dos oceanos; (3) estratificação térmica destes; (4) alteração do regime de ondas; (5) padrões de circulação oceânica¹⁴ e (6) nível do mar (entre 9 cm e 88 cm para o período de 1990 a 2100, segundo o Working Group II do IPCC, 2001; Figs. 9 e 10). As **alterações do nível do mar** podem ser *locais* ou *globais*.

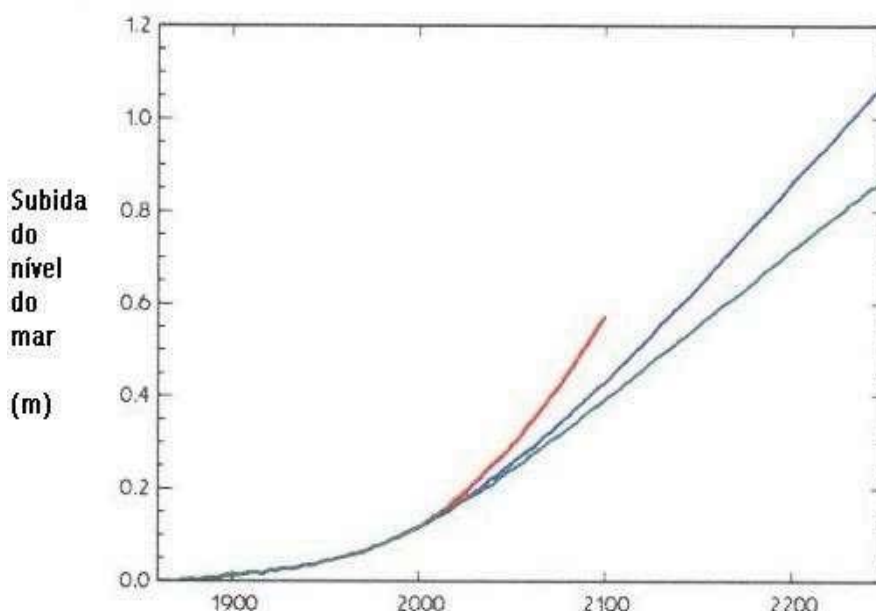


Figura 9 – Previsões da Subida do Nível do Mar para o ano 2080 para os 3 Cenários Base de Emissões; vermelho – sem redução de emissões; azul – estabilização da emissão de CO₂ a 750 ppm; verde – estabilização da emissão de CO₂ a 550 ppm (Working Group II do IPCC, 2001)

¹⁴ Causando mudanças na distribuição global do calor dos trópicos para os pólos, e consequente alteração dos climas das zonas costeiras.

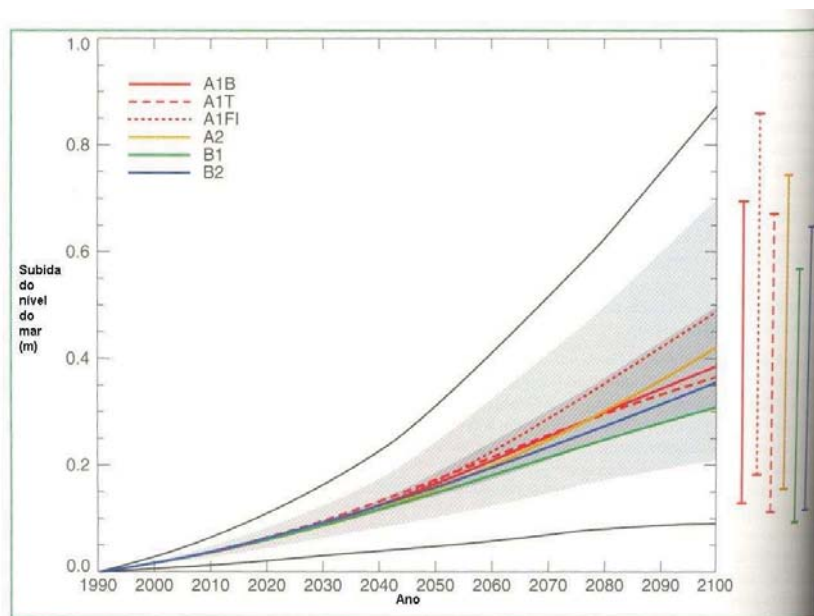


Figura 10 – Subida do Nível do Mar para os Vários Cenários SRES desde 1990 a 2100 (Working Group I do IPCC, 2001 c)

A alteração global do nível do mar é afectada por fenómenos climáticos ou geotectónicos à escala planetária enquanto que as alterações locais do nível do mar resultam da alteração global do nível do mar somada às alterações provocadas pela evolução geotectónica local. As alterações do nível do mar provocadas pelos fenómenos climáticos devem-se a dois mecanismos: a expansão térmica dos oceanos¹⁵ assim como ao efeito da distribuição de calor, particularmente importante no Hemisfério Norte (em especial nos países nórdicos), a que estão associados o degelo dos glaciares e calotes polares. As observações actuais do nível do mar mostram (Working Group I do IPCC, 2001 e 2001 a):

1. Uma subida global do nível do mar durante o século XX da ordem dos 1,0 a 2,0 mm/ano (dados de marégrafos), com um valor médio da ordem dos 1,5 mm/ano;
2. Os raros registos de marégrafos com mais de 1 século de extensão sugerem que a taxa média de subida do nível do mar no século XX foi superior à registada no século XIX.
3. Os registos geológicos sugerem que o nível do mar pode ter subido a uma taxa média de 0,5 mm/ano nos últimos 6 000 anos, reduzida nos últimos 3 000 anos para 0,1 a 0,2 mm/ano, o que corresponde a um décimo do valor observado para o século XX;
4. A grande maioria das correntes marinhas dependem das condições climáticas das regiões por onde passam. À escala global a *circulação horizontal* depende da circulação dos ventos, em especial no caso da Corrente do Golfo e da Corrente do Labrador (Juliano, 2003); estas correntes são afectadas quando se

¹⁵ O valor mais provável de expansão térmica dos oceanos (e conseqüente subida do nível do mar) é de cerca de 20 cm para o ano 2100 (Titus e Narayanan, 1996).

consideram cenários de intensificação das circulações ciclónicas no Atlântico Norte. As *circulações verticais*, por sua vez, dependem largamente de pequenas variações regionais de temperatura (Juliano, 2003), pelo que as alterações da temperatura média do ar influenciarão a circulação termohalina no Atlântico.

Os **impactos da subida global do nível do mar** tendem a fazer-se sentir sobretudo nas zonas costeiras e nas regiões insulares, podendo ser particularmente importantes nas ilhas de pequena dimensão e/ou baixa altitude. Estes impactos, que se farão sentir muito provavelmente durante os próximos 500 anos, são (Douglas, 1995; Nicholls, 1999; Harvey, 1994; Linge, 1985, in Titus e Narayanan, 1996):

- *Aumento da intensidade e frequência de episódios de inundação ou submersão mais ou menos definitiva de regiões costeiras de baixa altitude* – causando perda de terras baixas e zonas agrícolas, afectando e destruindo ecossistemas. A perda de terras baixas é mais acentuada se a região em causa estiver em subsidência;
- *Redistribuição geográfica dos ecossistemas costeiros* – e consequente migração para o interior das actuais linhas de costa, aumentando a área dos habitats litorais marinhos e reduzindo a dos habitats litorais terrestres;
- *Redistribuição de calor pelas correntes oceânicas* – levando a uma duplicação da energia para aquecimento nos países situados a Norte, com consequente êxodo humano desses locais;
- *Aumento da erosão costeira e aceleração do recuo das linhas de costa* – gerada pelos novos balanços de aporte de sedimentos às zonas costeiras, pela alteração da intensidade erosiva do oceano dada a nova posição do nível médio global do mar e pelas alterações nos perfis topográficos dos fundos marinhos litorais (por alteração dos padrões e intensidade de erosão de fundo, padrões de transporte de sedimentos e porque a subida do mar submergiu áreas inicialmente emersas);
- *Perda de área emersa* – originada por: (1) inundação das zonas costeiras pela subida do nível médio do mar; (2) aumento da erosão costeira provocada pelas novas condições dinâmicas originadas pela subida do nível do mar; (3) maior erosão devido ao aumento da intensidade e frequência das grandes tempestades. No caso das ilhas esta perda acarreta a redução da área dos aquíferos basais, que está intimamente dependente da área emersa da ilha;
- *Aumento da frequência de inundações e de danos provocados por tempestades marítimas* – devido à maior elevação do nível do mar, provocando um mais fácil alagamento pelas ondas e marés das zonas litorais mais baixas, assim como inundações devidas a tempestades marinhas mais acentuadas. As alterações nas alturas das ondas oceânicas geradas pelos ventos (registado no Atlântico Norte) pode ser ainda um outro factor a ter em conta;
- *Subida dos níveis freáticos* – que pode originar a salinização de solos, morte de espécies vegetais, destruição/ameaça grave a ecossistemas pelo stress imposto às espécies vegetais, inundação de áreas baixas (que passam a situar-se a cotas abaixo dos novos níveis freáticos);

- *Salinização dos solos* – tornando-os potencialmente impróprios para a agricultura (Sherman, 1998);
- *Deslocação para o interior da interface água doce/água salgada e aumento do risco de intrusão salina* – por mor da deslocação da cunha salina para o interior das zonas emersas, devido ao desequilíbrio hidráulico que a subida do nível do mar gera na interface água doce/água salgada, pode verificar-se a salinização de furos, poços de maré e nascentes litorais sites actualmente nas proximidades do nível do mar; nalguns casos, se o recuo do litoral for significativo, pode mesmo dar-se a submersão dalguns destes pontos de água. Acresce-se que, no caso das ilhas, a linha de costa (dependente do nível do mar) define a área dos aquíferos de base e portanto a alteração do nível do mar¹⁶ afectará não apenas o risco de intrusão salina mas também a área destes mesmos aquíferos;
- *Salinização de reservatórios de água superficial e outros corpos de água doce* – originada pela novas condições hidráulicas impostas pela subida do nível do mar (ex.: efeitos de maré mais marcados) que favorecem a deslocação para montante das frentes salinas nos estuários e rios, podendo afectar poços e furos nos vales dos rios. A salinização dos corpos de água superficiais pode favorecer a drenância para os aquíferos destas águas de menor qualidade.

Outros impactos sobre os Recursos Hídricos (Fig. 11), causados pela **subida global do nível do mar, modificação nos padrões de circulação atmosférica¹⁷ e circulação oceânica**, capazes de afectar tanto a sua quantidade como a sua qualidade, são:

- Alterações nos regimes de caudais dos rios, frequências de inundações e transportes sedimentares e de nutrientes, em especial nas zonas mais áridas. Todos os factores acima enunciados contribuem para a alteração das taxas de recarga podendo levar a alterações não apenas na quantidade de recursos disponíveis mas também na sua qualidade pois as modificações nos regimes de recarga podem favorecer a concentração de alguns poluentes nas águas de infiltração;
- Aumento do acarreo de pesticidas, fertilizantes e herbicidas, entre outros poluentes, para regiões deprimidas (potenciais áreas de recarga), nas regiões favoráveis a um aumento do escoamento superficial;
- Maior vulnerabilidade, sobretudo dos pequenos aquíferos, aos períodos de estiagem devido a uma maior variabilidade das precipitações;
- Possível redução de água disponível para consumo, nas zonas em risco de seca;
- Aumento dos consumos de água, gerados pela subida das temperaturas atmosféricas, o que imporá um acréscimo de stress sobre os sistemas hídricos; a sobreexploração dos aquíferos terá também, nestas condições, impactos sobre a qualidade das águas;

¹⁶ Que afectará a posição da linha de costa quer pelo processo de submersão do litoral pela subida do nível do mar, quer pelo potencial aumento de erosão costeira por efeito desta mesma subida.

¹⁷ Que afectam temperatura, ventos e precipitação.

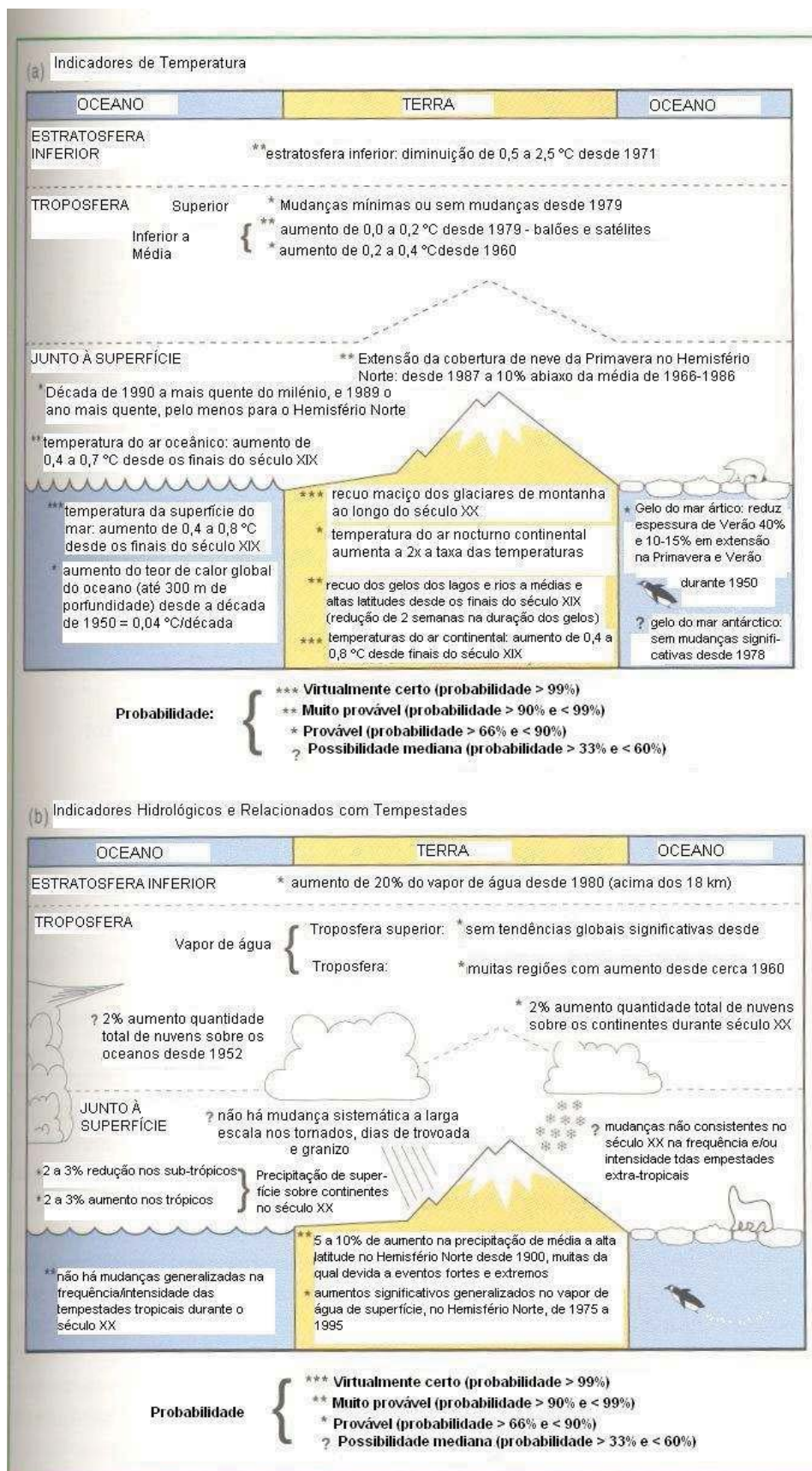


Figura 11 – Impactos das Alterações Climáticas sobre o Ciclo Hidrológico (Working Group I do IPCC, 2001 c)

- Alterações na erosão dos solos devido a mudanças da vegetação e dos regimes de escoamento superficial, alterando o efeito filtrante que a cobertura vegetal e pedológica teria sobre os poluentes.

Os impactos das alterações climáticas sobre as actividades económicas e aspectos sócio-económicos, tais como:

- Aumento da vulnerabilidade ou mesmo interrupção de infra-estruturas e sistemas de produção (indústria, agricultura, serviços, abastecimento de água, etc.);
- Aumento do stress sobre as actividades agrícolas¹⁸;
- Alterações nas práticas e necessidades hídricas agrícolas;
- Inundação de zonas costeiras e perda de terras agrícolas devido à subida global do nível do mar;
- Mobilidade das populações;
- Ocupação do território;
- Modificações na demografia.

provocam por sua vez impactos sobre os recursos hídricos, afectando especialmente o balanço disponibilidades/consumos.

Os impactos das alterações climáticas têm expressões e intensidades distintas de local para local do planeta, sendo algumas regiões particularmente susceptíveis. Esta resposta diferencial deve-se a vários aspectos, de que se salienta: a latitude do lugar, a distância à linha de costa, o clima local actual, a geomorfologia, a topografia, os ecossistemas e seu grau de conservação, as acções humanas. O exemplo mais expressivo é a variação das precipitações em função da latitude que, segundo resultados dos modelos climáticos globais, mostram uma tendência de subida nas altas latitudes e de redução nas faixas climáticas sub-desérticas e mediterrânicas, causando impactos distintos em cada zona. Entre as áreas mais vulneráveis às alterações climáticas citam-se (Sear *et al.*, 2001):

- Os ecossistemas recifais (particularmente vulneráveis) e demais ecossistemas das zonas litorais e costeiras;
- As regiões insulares;
- As zonas polares e circumpolares;

¹⁸ Segundo Hay (1997; 2000) em consequência dos ciclos mais exacerbados do El Niño, secas anómalas afectaram várias culturas nalgumas áreas do Pacífico, criando graves reduções no abastecimento de água ao passo que noutras regiões ocorreram graves inundações.

- As regiões de economias pouco diversificadas (são especialmente vulneráveis a desastres de origem climática)¹⁹.

Embora as regiões insulares sejam no geral muito vulneráveis às alterações climáticas, esta vulnerabilidade depende das dimensões, topografia, latitude, localização face a correntes oceânicas, microclima local e actividade geotectónica. A climatologia destas regiões resulta sobretudo da interacção das massas de ar com o relevo, a que se associa o controle climático das correntes oceânicas envolventes. Os recursos hídricos insulares são limitados, devido à pequena dimensão dos aquíferos (quando comparados com os sistemas aquíferos continentais), à impossibilidade destes serem abastecidos a partir de outras regiões, e pelas características hidrodinâmicas de alguns dos materiais destes aquíferos (ex.: formações muito fracturadas, com grande densidade de tubos de lava, etc.) que favorecem uma rápida circulação das águas subterrâneas e sua desapareção no meio oceânico (por exsurgências submarinas) (cf. Rodrigues, 2002 a). Assim, ao invés das regiões continentais, onde transvases e outras tecnologias afins são possíveis, uma ilha tem de sobreviver com os recursos hídricos que encontra em si mesma porque *ou nela ocorre precipitação quanto basta para gerar recursos hídricos aproveitáveis ou, se não ocorre, torna-se inabitável para a espécie humana*.

Deste modo qualquer alteração dos volumes e intensidades das precipitações, duração da estação húmida, duração média dos eventos individuais de precipitação, frequência e intensidade das tempestades tropicais tem importantes impactos na recarga e volume de recursos disponíveis, e portanto a vulnerabilidade duma zona insular a estas mudanças é no geral bastante elevada, dado a precipitação ser a única fonte de recarga dos aquíferos, e em última análise controlar a existência de cursos de água (perenes ou temporários), lagoas, etc.

Por outro lado a alteração global do nível do mar causa importantes impactos nas ilhas, dependendo sobretudo da topografia e sua constituição litológica. Ilhas de topografia aplanada e cotas reduzidas (ex.: ilhas de atol) tendem a sofrer uma intrusão salina mais significativa do que ilhas de topografia mais vigorosa, dado a carga piezométrica dos aquíferos basais ser pequena. Acresce-se que alguns dos aquíferos mais importantes das ilhas (aquíferos litorais), em especial nas de baixa topografia, estão em contacto directo com o mar, sendo muito susceptíveis aos problemas de intrusão salina associados às alterações do nível do mar; esta susceptibilidade é agravada pelo facto de em muitos casos só poderem ser explorados na franja litoral, o que se torna especialmente crítico quando são as principais fontes de abastecimento (Hay e Kaluwin, 1993; Hay, 2000). Se se admitirem cenários de maiores consumos como resposta de adaptação humana a um aquecimento global, que terão reflexos tanto na qualidade como na quantidade das águas exploradas, compreende-se a vulnerabilidade dos recursos hídricos insulares às alterações climáticas.

¹⁹ Porque são regiões com pouca capacidade para lidar com desastres climáticos e frequentemente com uma economia agrícola dominante, dependente de condições climáticas favoráveis, donde qualquer alteração do clima provoca sérios danos ao tecido económico e social, daí a sua vulnerabilidade. Além disso, muitas destas regiões situam-se em áreas geograficamente susceptíveis a efeitos adversos das alterações climáticas.

No caso dos Açores, o estudo das alterações climáticas tem sido realizado pelos projectos Alterações Climáticas Globais nos Açores e Península Ibérica (Projecto PRAXIS XXI), o projecto “Simulation of Impacts of Global Changes on the Hydrologic Cycle in Relation to the Use of the Soil”, assim como pela equipa do Projecto SIAM²⁰, este último versando sobretudo os aspectos meteorológicos, estando a análise dos impactos destas alterações sobre os recursos hídricos do arquipélago em fase inicial. O meio hídrico subterrâneo dos Açores será afectado pelas alterações dos processos atmosféricos e, no caso dos aquíferos litorais, pelas alterações do nível do mar, e talvez por possíveis mudanças no funcionamento da Corrente do Golfo (importante veículo de transformação do clima no Atlântico, cf. Schneider, 2004). Alguns cenários sugerem a diminuição acentuada ou mesmo a desapareção desta corrente oceânica, como resposta ao aquecimento global, sendo mal conhecidos os impactos que tal possa acarretar nos climas das zonas por ela actualmente influenciadas (Tarling, 1997; Schneider, 2004).

²⁰ Do qual se dará nota detalhada no capítulo seguinte.

3. ESTADO DOS CONHECIMENTOS SOBRE ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS E HIDROGEOLOGIA DOS AÇORES

Neste capítulo resume-se o estado do conhecimento sobre os aspectos mais importantes das alterações climáticas a nível mundial e a nível nacional, em especial os aspectos associados aos recursos hídricos, que não hajam sido referidos nos capítulos anteriores. Apresenta-se também um resumo dos conhecimentos actuais sobre a hidrogeologia dos Açores referenciando-se algumas das lacunas mais importantes nestas matérias.

3.1. Avaliação do Estado dos Conhecimentos sobre Alterações Climáticas

As **alterações climáticas** possivelmente não se limitam apenas a modificar os regimes de precipitação e consequente recarga de aquíferos (e portanto modificar o volume total de recursos hídricos exploráveis de modo sustentável), nem a alterar o nível do médio dos oceanos mas também a modificar o coberto vegetal e as necessidades e práticas e hídricas agrícolas, implicando alterações nos consumos de água, gerando possivelmente impactos indirectos na qualidade dos recursos hídricos e portanto, ainda que por efeitos colaterais, na resiliência dos aquíferos à poluição. Além do aumento do risco da intrusão salina, já discutido no capítulo anterior, outros impactos sobre a qualidade das águas subterrâneas incluem: (1) aumento do escoamento superficial e consequente arraste de pesticidas, fertilizantes e herbicidas usados pela agricultura para zonas preferenciais de recarga²¹; (2) variações na taxa de recarga, e consequente alteração na concentração de poluentes nas águas de recarga; (3) alterações na taxa de erosão dos solos devido a mudanças na vegetação e no escoamento superficial, afectando a cobertura pedológica e portanto o seu efeito filtrante sobre os poluentes; (4) incremento da sensibilidade dos aquíferos à estiagem, em especial dos aquíferos muito superficiais e de reduzidas dimensões; (6) degradação da qualidade das águas pela sobreexploração dos aquíferos como resposta às alterações climáticas. É provável que as alterações climáticas promovam ainda outros impactos que actualmente não são sequer reconhecidos.

Com base nos diversos cenários de alteração climática e emissões de gases de estufa considerados pelo IPCC, os impactos sobre as actividades económicas, capazes de se reflectir nos recursos hídricos (IPCC, 2001; Working Group I do IPCC, 2001 a e b; Working Group II do IPCC, 2001; Sear *et al.*; 2001), são:

- Alteração nos consumos associados à actividade turística;
- Disrupção nos sistemas de abastecimento de água;

²¹ Como lagoas e certas áreas de topografia deprimida (ex.: bacias endorreicas).

- Stress sobre as actividades agrícolas, devido ao aumento da evapotranspiração, o que tenderá a conduzir ao aumento da irrigação que, no caso das baixas latitudes, se sobreporá a uma menor precipitação (e consequente recarga de aquíferos);
- Vulnerabilidade à redução de água disponível para os consumos, especialmente nas zonas mais sujeitas a secas e nas áreas de já escassos recursos hídricos.

Exemplos destes impactos sobre a recarga são estudos em regiões semi-áridas de África onde se estimaram quebras de até 45% desta, face a uma redução de precipitação da ordem dos 15% (National Assessment Team 2000 b); Gleik e Adams, 2000), ou o estudo de Chen *et al.* (2000) para o aquífero de Edwards (Texas) que, para um conjunto de cenários de alteração climática, calcularam quebras de recarga entre 20,6% e 32,9% nos anos secos e 23,5% a 48,9% nos anos húmidos enquanto que os consumos tendiam a aumentar 31,3% (necessidades de irrigação calculados pelo modelo EDSIM). As economias pouco diversificadas são muito vulneráveis a desastres relacionados com o clima, enquanto as zonas insulares são muito vulneráveis a períodos de escassez de água devidos a uma maior variabilidade das precipitações (IPCC, 2001). Na sua globalidade os impactos das alterações climáticas serão tanto mais adversos quanto maiores forem as emissões cumuladas de gases de efeito de estufa e aerossóis.

No caso da Europa verifica-se que os impactos das alterações climáticas são distintos consoante se considera as regiões sul ou norte e que, de acordo com Parry (2000) citado pelo WMO (2001), em particular para os recursos hídricos, as pressões actuais e futuras tenderão a exacerbar-se e a incrementar o risco de faltas de água, sobretudo nos países do sul, assim como a aumentar as diferenças em recursos disponíveis entre os países do norte e os do sul. Na realidade parecem existir impactos diversos para as várias regiões da Europa (Parry, 2000) :

➤ **para o sul:**

- Uma duplicação na frequência de verões quentes;
- Um decréscimo em cerca de ¼ dos abastecimentos potenciais de água, reduzindo o potencial agrícola e exigindo planificação cuidada das necessidades urbanas;
- Aumento da desertificação e dos fogos florestais assim como do stress sobre as florestas e diminuição da produtividade das florestas comerciais;
- Aumento do risco de secas.

➤ **para o norte:**

- Redução para metade, por volta de 2020, dos invernos frios;
- Fortes efeitos adversos no ambiente, nomeadamente o recuo da tundra, a perda de espécies árticas e a perda de 50 a 90% dos glaciares alpinos no final do próximo século;
- Efeitos potencialmente positivos na produtividade agrícola e florestal assim como eventualmente de disponibilidade de água (embora possam aumentar os riscos de inundações).

Se os impactos das alterações climáticas são variáveis de região para região do Globo, em função das características geográficas, geológicas, ecológicas e climáticas locais, além das condições sócio-económicas, as ilhas, deltas, litorais arenosos, zonas húmidas e na sua generalidade todas as zonas costeiras são muito sensíveis às alterações do nível do mar induzidas pelas alterações climáticas (Nicholls e La Vega-Leinert, 2002) e respectivos impactos (Douglas, 1995; Tsyban *et al.*, 1990; IPCC, 2001; Nicholls e La Vega-Leinert, 2000).

O IPCC (2001) refere que, no caso das zonas insulares de atol do Pacífico, uma redução da precipitação associada ao efeito da subida global do nível do mar causaria não apenas a diminuição do volume de água potável mas a diminuição nas dimensões dos respectivos aquíferos de base; no caso de reduções globais da precipitação em áreas propensas a secas – ex.: Malta e Chipre – ou onde as precipitações são concentradas só em dados períodos do ano e/ou onde o escoamento superficial é muito elevado (ex.: Caraíbas), as alterações nos padrões de precipitação, nomeadamente as modificações nas frequências do El Niño e La Niña poderão levar à redução do volume de recursos hídricos em várias regiões do Pacífico (cf. National Assessment Synthesis Team; 2000 a e b). Por seu lado, o aumento da temperatura pode originar a degradação da qualidade das águas em áreas onde o nível freático é muito superficial, devido ao aumento da evapotranspiração e dos processos de salinização da zona vadosa²².

Nalgumas regiões, porém, as alterações climáticas originam a subida das precipitações, o que não implica necessariamente a ocorrência de uma maior recarga de aquíferos, conforme demonstra Holman *et al.* (2002), num estudo para East Anglia e North West (Inglaterra), em que o incremento da precipitação origina em regra um decréscimo na recarga de aquíferos, ainda que pequeno. Neste estudo o modelo ACCESS²³ é acoplado ao modelo SFARMMOD (Audsley, 1981) que prevê a distribuição dos usos do solo com o modelo SWANCATCH (Holman *et al.*, 2001; Hollis e Brown, 1996), o qual com base nos outputs dos modelos anteriores simula: (1) fluxo médio semanal dos rios, (2) escoamento de base do fluxo médio semanal dos rios, (3) escoamento directo do fluxo médio semanal dos rios, (4) variações semanais do volume de água subterrânea armazenada, (5) recarga anual média, (6) concentração semanal média de nitratos nas águas superficiais, (7) e subterrâneas.

Contudo, para as zonas insulares e costeiras, as alterações nas condições meteorológicas não são as únicas causas de impactos significativos nos recursos hídricos. A **alteração do nível do mar** desempenha um papel muito importante nestas regiões e o estudo de Gaffin (1997) sobre os impactos da subida global do nível do mar em zonas costeiras²⁴, assinala por exemplo, para uma subida de 80 cm, a submersão de cerca de 65% do território das Ilhas Marshall. Como a subida do nível do mar é um fenómeno de resposta retardada (isto é, mesmo que se terminasse hoje a emissão dos gases de efeito de estufa, esta subida continuaria a verificar-se, em resposta ao conjunto

²² Actualmente comuns nas zonas semidesérticas.

²³ Modelo de culturas agrícolas que simula as interacções entre o solo, clima e crescimento das culturas com a precipitação eficaz (cf. Loveland *et al.*, 1993; Rounsevell *et al.*, 1996).

²⁴ Considerando intervalos de subida de 10 cm até atingir o limite máximo de 1 m.

de emissões verificadas no passado) os impactos devidos a este processo continuarão a verificar-se ao longo das próximas décadas (Nicholls, 1997). Estas alterações afectam as taxas de **erosão e recuo do litoral**, normalmente definidas para litorais de areia pela regra de Bruun (1962; cf. CEM, 2002) embora para outros tipos de litoral (de arriba, mangroves, etc.) não se possa definir modelos universais de erosão, dada a grande variabilidade de comportamentos destes litorais. A relação L/D definida pela regra de Bruun (definindo o recuo da linha de costa numa praia de areia) é no geral duas ordens de magnitude superior ao valor da subida do nível médio do mar, ou seja, para uma subida de 4 mm/ano, valor médio na costa atlântica dos EUA, o litoral pode recuar até 4 m por década (Douglas, 1995). No entanto Alvarez (1998) admite para uma praia de areia uma taxa de erosão média cerca de 150 vezes a subida do nível do mar, ou seja, um recuo de 6 m por década, para os mesmos 4 mm de subida do nível do mar. Esta subida afecta, como já se viu, as condições para a ocorrência de **intrusão salina** e observações em estados insulares do Pacífico revelam a salinização de várias captações, que pode dever-se à subida global do nível do mar registada nessas áreas, como à sobreexploração dos aquíferos (Sinclair, 1999).

Os impactos sobre a biosfera, em especial a agricultura, com reflexos nos consumos e stress imposto ao meio hídrico, ocorrem pelo aumento da temperatura podendo levar a secas e ao colapso das produções, embora o aumento CO₂ possa aumentar a taxa de crescimento da generalidade das plantas. Por seu lado as alterações do nível do mar têm impactos indirectos sobre a agricultura, induzidos pela perda de terras aráveis, tanto por submersão como por salinização dos solos e dos aquíferos costeiros (Gommes *et al.*, 1998). Certos tipos de coberto vegetal natural, como o *Sphagnum*, podem sofrer redução se as alterações climáticas acarretarem reduções da precipitação e dos dias nublados, embora seja menos afectada pela subida da temperatura de per se (cf. Harasawa, 2000). Este é um dos exemplos em como as alterações climáticas podem originar ambientes para os quais um conjunto de espécies terá mui reduzida tolerância (McLeod e Conner, 1996). Outros impactos das alterações climáticas sobre zonas húmidas da Inglaterra e Irlanda podem ser observados num estudo, em que se definiu que a relação evapotranspiração/precipitação causará um aumento da profundidade dos níveis freáticos, gerando condições de seca severa para vários destes habitats, levando à alteração no número e tipo de espécies ou mesmo à quase extinção de algumas²⁵ (Harrison *et al.*, 2001). Vê-se assim que as diferentes regiões do globo apresentam diferentes **vulnerabilidades às alterações climáticas**. Para definir esta vulnerabilidade são necessários indicadores dos sistemas climáticos e dos impactos devidos a estas alterações. Basher (1998), para a Nova Zelândia, e Manton e Jasper (1998), para a Austrália, propõem um conjunto de indicadores que englobam: (1) Temperatura média atmosférica; (2) Índice da Oscilação Sul (associada aos eventos de El Niño e La Niña); (3) Índice de precipitação; (4) Índices de intensidade da circulação atmosférica; (5) Temperatura média da superfície oceânica a nível regional; (6) Nível médio do mar; (7) Extremos de precipitação e temperatura; (8) Temperatura média troposférica e mínima média estratosférica; (9) Ocorrência de ciclones tropicais; (10) Taxa de evaporação média; (11) Emissões totais anuais de gases de efeito de

²⁵ A resposta das espécies vegetais destes ecossistemas foi modelada pelo modelo SPECIES (Harison *et al.*, 2001).

estufa; (12) Índice de dias com défice hídrico no solo; (13) Índice de escoamento superficial; (14) Índice de fogos florestais; (15) Índice de cheias; (16) Erosão ou assoreamento costeiro; (17) Custos por eventos de extremos meteorológicos; (18) Carga média de aerossóis; (19) Produção agrícola nacional, entre diversos outros.

Índices de vulnerabilidade foram desenvolvidos por Gommaes *et al.* (1998), que criou um índice de insularidade como base para a análise da vulnerabilidade à subida do nível do mar; este índice é função da insularidade de uma região e sua densidade populacional, mas não analisa a distribuição espacial da população ou a vulnerabilidade real das zonas baixas ao longo do litoral. Watson *et al.* (1998) utilizando o índice de vulnerabilidade às alterações climáticas de Briguglio (1993) (que considera para cada nação a dependência das exportações, a insularidade e remotividade e a predisposição aos desastres naturais) verifica que as regiões insulares de ilhas pequenas são bastante vulneráveis, com índice médio da ordem dos 0,539 (mínimo 0 = baixa vulnerabilidade; máximo 1 = muito alta vulnerabilidade). Esta vulnerabilidade, para as zonas costeiras, é a incapacidade de adaptação do sistema às consequências das alterações climáticas e subida do nível do mar, devendo definir-se dois tipos de vulnerabilidade (SURVAS, 2000):

- **A Vulnerabilidade Natural dos Sistemas** – que é função da:
 - ◆ **Susceptibilidade Natural**, isto é, o potencial do sistema em ser afectado pela subida do nível do mar, o que é largamente independente das influências humanas.
 - ◆ **Resistência e Resiliência**, que são fortemente influenciadas pela acção humana consistem em:
 - ◇ *Resiliência* – a velocidade a que o um sistema regressa ao seu estado natural após ter sido perturbado;
 - ◇ *Resistência* – a capacidade do sistema evitar ser perturbado.
 - ◆ **Capacidade de Adaptação Autónoma** – a resposta espontânea do sistema à subida do nível do mar; esta é determinada pela resiliência e resistência do sistema.
- **A Vulnerabilidade Sócio-económica.**

A vulnerabilidade às alterações climáticas tem sido estudada sobretudo em termos de **vulnerabilidade de zonas costeiras à subida do nível do mar** (global e/ou local), levantando-se o problema da qualidade e extensão das séries de dados dos marégrafos a partir das quais se tem calculado as tendências de subida do nível do mar, sendo apenas adequadas séries com uma extensão mínima de 50 anos de observações, pois séries de extensão inferior tendem a ser muito influenciadas pelas variações de baixa frequência do nível do mar fornecendo estimativas erróneas (Douglas, 1995). Várias metodologias de análise de vulnerabilidade à subida do nível do mar foram desenvolvidas, das quais se destacam (SURVAS, 2000, Nicholls, 1998):

- **Metodologia Comum** – define **vulnerabilidade** como a capacidade de uma nação fazer face às consequências da aceleração da subida do nível do mar e outros impactos costeiros das alterações climáticas (Nicholls, 1994); esta

metodologia analisa os impactos das alterações climáticas na população, economia, ecossistemas e tecido social, usando dois cenários de subida do nível do mar, para o ano 2100: (1) subida global de 0,3 m e (2) subida global de 1 m.

- **South Pacific Islands Methodology** (Metodologia das Ilhas do Pacífico Sul);
- **IPCC Technical Guidelines**;
- **US Country Studies**;
- **UNEP Guidelines/Handbook Methodology** – deve seguir 5 fases (Nicholls, 1998): (1) definição do problema; (2) cenários de avaliação da vulnerabilidade do litoral; (3) avaliação de impactos; (4) definição de adaptações autónomas; (5) definição da adaptação planificada.
- **Caribbean Disaster Mitigation Project**;
- **Research Institute for Knowledge Systems Methodology**;
- **SURVAS** (Synthesis and Upscaling of Sea-Level Rise Vulnerability Assessment Studies);
- **Índice de Vulnerabilidade Costeira (CVI)** – baseia-se em seis variáveis de risco, que variam de 1 (risco mínimo) a 5 (risco máximo), cujos valores são função da magnitude da sua contribuição para as alterações físicas do litoral à medida que o nível do mar sobe (Thieler e Hammar-Klose, 1999): (1) Geomorfologia – definida em cinco classes: (a) Muito baixa – litoral de arribas rochosas consolidadas, fiordes; (b) Baixa – litorais recortados, litorais de arribas de consolidação moderada; (c) Moderada – arribas de baixa altitude e/ou baixa consolidação, planícies aluviais, depósitos glaciares; (d) Alta – praias de calhau, lagunas, estuários, (e) Muito Alta – ilhas de barreira, praias de areia, zonas húmidas salinas, “mudflats”, recifes de coral, mangais, deltas; (2) Taxas de erosão e/ou assoreamento costeiro (em mm/ano); (3) Declive do litoral (em %); (4) Taxa da subida local do nível do mar (em mm/ano); (5) Intervalo médio entre marés (em m); (6) Altura média das ondas (em m).
- **Environmental Vulnerability Index (EVI)** – identifica 3 aspectos da vulnerabilidade ambiental (definida conforme Nicholls, 1998), que correspondem a três sub-índices (Kaly *et al.*, 1999 a e b): (1) **Riscos para o ambiente** (naturais e antropogénicos), dado pelo sub-índice Risco de Exposição (REI) – considera a frequência e se possível a intensidade dos eventos causadores de risco que afectam o ambiente; é na prática uma avaliação do risco potencial; (2) **A resiliência²⁶ do sistema natural**, dado pelo sub-índice Resiliência Intrínseca (IRI) – mede a capacidade do sistema em suportar desastres; (3) **A integridade do ecossistema²⁷**, dado pelo sub-índice Degradação Ambiental (EDI); descreve a degradação ecológica dos ecossistemas, pois quanto mais degradados, maior a vulnerabilidade provável da região a desastres futuros. O **índice EVI** é uma média ponderada dos três sub-índices (REI, IRI, EDI), e cada **sub-índice** (REI, IRI, EDI) é uma média ponderada dos valores dos respectivos indicadores. Existem 57 indicadores, com valores de 0 a 7: (1) 39 de risco (alocados ao sub-índice REI), (2) 5 de

²⁶ A capacidade natural do sistema natural em se adaptar/lida com os riscos.

²⁷ O estado/saúde do ambiente resultante de impactos anteriores.

resiliência (do sub-índice IRI), (3) 13 de degradação ambiental (do sub-índice EDI). Quanto maior o valor do EVI, maior vulnerabilidade ambiental do território, havendo as seguintes classes de vulnerabilidade para cada indicador (Quadro III) e os seguintes indicadores (Quadro IV):

Quadro III – Classes de Vulnerabilidade para a Metodologia EVI (Kally *et al.*, 1999 b)

Classificação/Escala						
1	2	3	4	5	6	7
Menor frequência possível	Significativamente abaixo da média	Levemente abaixo da média	Média	Levemente acima da média	Significativamente acima da média	Maior frequência possível

Quadro IV – Classes de Indicadores de Vulnerabilidade para a Metodologia EVI (Kally *et al.*, 1999 b)

Sub-Índices EVI	Classes de Indicadores	Número de Indicadores	
REI	Meteorológicos	6	
	Geológicos	4	
	Antropogénicos	Habitat	1
		Agricultura	5
		Pescas	5
		Governo	4
		Mineiração	3
	Poluição	8	
Factores de Risco e Mitigação	3		
IRI	IRI	5	
EDI	Ecosistemas	10	
	Biodiversidade	3	

- **EVI modificado** – foi simplificado para 47 indicadores inclusos em dois sub-índices (Kaly *et al.* 1999 b): (1) **Sub-índice REI** – inclui 27 indicadores; (2) **Sub-índice RI** (sub-índice Resiliência) – incorpora os anteriores sub-índices IRI e EDI; engloba 13 indicadores associados ao anterior EDI e 7 indicadores associados ao anterior IRI. Os novos indicadores distribuem-se pelas seguintes classes: (1) **Meteorológicos**, 6 indicadores; (2) **Geológicos**, 3 indicadores, (3) **Características da região/país**, 7 indicadores, (4) **Factores biológicos**, 8 indicadores, (5) **Factores antropogénicos**, 23 indicadores. Tem de se possuir informação para pelo menos 80% dos indicadores para que se possa proceder ao cálculo do EVI (Kaly *et al.*, 2000).
- **Global Vulnerability Assessment** – pretende fornecer uma estimativa a nível mundial das implicações ecológicas e sócio-económicas da aceleração da subida global do nível do mar e considera 4 elementos de base: (1) população em risco; (2) área de zonas húmidas perdida; (3) alteração das produtividades/produções de arroz; (4) custos de protecção do litoral. Considera classes de vulnerabilidade (Quadro V):

Quadro V – Classes de Vulnerabilidade da Global Vulnerability Assessment Methodology (Hoozemans e Hulsberg, 1993; SURVAS, 2000)

Impactos	Classes de vulnerabilidade			
	Baixa	Média	Alta	Crítica
População afectada (%)	< 1%	1-10%	10-50%	> 50%
População em risco	< 10	10-100	100-500	> 500
Perdas económicas	< 1%	1-3%	3-10%	> 10%
Área perdida de terra emersa	< 3%	3-10%	10-30%	> 30%
Custos de protecção	< 0,05%	0,05-0,25%	0,25-1%	> 1%
Área perdida de zonas húmidas	< 3%	3-10%	10-30%	> 30%

Na maior parte dos casos há 7 factores comuns considerados, sendo os 5 primeiros independentes das medidas de adaptação humana, enquanto os 2 últimos consideram as consequências das adaptações humanas à subida do nível do mar (SURVAS, 2000):

- **Número de pessoas afectadas** – população vivendo nas zonas de risco afectadas pela subida do nível do mar;
- **Número de pessoas em risco** – população média afectada por inundações devidas a tempestades marítimas;
- **Perdas materiais** – o valor das infra-estruturas que podem ser perdidas pela subida do nível do mar;
- **Área perdida** – área de terra perdida devido à subida do nível do mar;
- **Zonas húmidas perdidas** – a área de zonas húmidas perdida devido à subida do nível do mar;
- **Custos potenciais de medidas de adaptação** – com uma ênfase especial na escolha pelas medidas de protecção;
- **Número de pessoas em risco pressupondo as medidas de adaptação consideradas no factor acima.**

São ainda de reter os conceitos de **Dano** (redução de diversidade, extensão, qualidade e funcionamento dos ecossistemas) e **Degradação** (dano irreversível), conforme Briguglio *et al.* (1999).

Todas estas questões têm um importante grau de incerteza, devido ao desconhecimento do funcionamento dos fenómenos causadores das alterações climáticas, da inter-relação (sobretudo quantitativa) das variáveis envolvidas e das suas consequências, devendo definir-se pelo menos três **tipos de incerteza**:

- A referente ao funcionamento e/ou tipo de fenómenos envolvidos;
- A referente às variáveis associadas às varias causas e consequências das alterações climáticas;
- A referente à incerteza associada à modelação das alterações climáticas e do ciclo hídrico.

Carter e Hulme (2000, Cramer *et al.*, 2000) consideram quatro aspectos das incertezas:

- **Factores impulsionadores** – relacionam-se com as incertezas inerentes ao próprio desenvolvimento das sociedades humanas e à previsão dos volumes de emissões. Aqui o conhecimento é em larga medida “não alcançável” e a única forma de gerir as incertezas é aplicar conjuntos de cenários aos estudos de impacto;
- **Alterações climáticas** – enquanto os modelos climáticos regionais (RCM's) podem fornecer uma informação sobre alterações climáticas mais credível em regiões de topografia heterogénea, possuem no entanto incertezas na estimativa das alterações em grande escala, similares aos modelos climáticos globais;
- **Subida do nível do mar** – as incertezas na estimativa a nível regional devidas à expansão térmica dos oceanos (descontando já as questões das reduzidas séries de dados e possíveis erros de medição) são pelo menos da mesma ordem de grandeza das incertezas associadas às estimativas da subida do nível do mar a nível global;
- **Impactos** – as incertezas nesta área são fortemente dependentes do tipo de sector em análise, grau de exposição a estas alterações e região de estudo.

As fontes de incerteza nos modelos climáticos são (Bazzaz e Somroek, 1995; Katz, 2001):

- **Curtos registos temporais** de dados meteorológicos;
- **Conhecimento incompleto** dos processos subjacentes aos modelos de circulação global da atmosfera;
- **Reduzida resolução espacial** destes modelos;
- **Conhecimento insuficiente das respostas directas e indirectas**, a longo prazo, dos sistemas físicos e biológicos;
- **Reduzido conhecimento detalhado:**
 - do papel das nuvens nas alterações climáticas e/ou funcionamento do clima;
 - da resposta das calotes polares ao aquecimento global;
 - da resposta dos solos ao aquecimento global;
 - da relação entre a variabilidade da actividade solar e o clima;
 - das relações causa/efeito entre o CO₂ e outros gases atmosféricos, assim como aerossóis, e temperaturas de superfície;
 - do impacto da alteração do coberto vegetal no teor de humidade da atmosfera;
 - das contribuições antropogénicas futuras;
- **Outras variáveis;**
- **Erros de medição** – erros aleatórios e sistemáticos;

- **Variabilidade dos processos envolvidos** – variação sistemática dos fenómenos no espaço e no tempo e aleatoriedade inerente aos fenómenos;
- **Estrutura dos modelos** – relacionada com as funções e variáveis de previsão que estruturam os modelos. Em muitos casos o aumento da dimensão e/ou complexidade dos modelos pode reduzir a incerteza mas apenas até um certo ponto; a partir de dado limite este aumento pode de facto gerar um aumento da incerteza. É importante fonte de incerteza e tem possível impacto significativo nos resultados da análise;
- **Efeitos de escala e agregação** – escala de funcionamento espacial ou temporal do modelo e/ou dos dados.

Nos modelos hidrológicos as incertezas devem-se a (Arnell, 1999):

- Tipo de modelo utilizado;
- Parametização do modelo;
- Precisão dos dados de entrada;

Arnell (1999) considera que a maioria das incertezas se relaciona com a definição dos cenários hidrológicamente adequados, sendo mui importante a distinção entre incertezas devidas a conhecimento “incompleto” e as devidas a à impossibilidade de se atingir um total conhecimento dos fenómenos (“conhecimento não alcançável”), e que no caso dos domínios da água a existência da incerteza devida ao “conhecimento não alcançável” faz com que nunca se possa trabalhar apenas com um único cenário. O conhecimento incompleto dos processos afecta a estrutura dos modelos utilizados, sejam modelos climáticos ou de impacto e o conhecimento “não alcançável” é intrínseco a fenómenos complexos como os sistemas humanos e/ou climáticos (ex.: é impossível prever com absoluta certeza a evolução futura das emissões de origem antropogénica). Deve ainda considerar-se as incertezas ao nível de (Hulme e Carter, 1999 in Carter *et al.*, 1999): (1) cenários de alterações climáticas (impactos das emissões sobre a atmosfera); (2) à imprevisibilidade dos sistemas climáticos; (3) à variabilidade natural do clima; (4) à variabilidade climática a escalas inferiores às da malha dos modelos; (5) erros nos dados de entrada/modelos incompletos; (6) alterações da estrutura dos modelos ou seus parâmetros ao longo do tempo; (7) imprevisibilidade sistémica; (8) estrutura errónea ou desconhecida dos parâmetros e/ou modelos.

Outra fonte de incerteza ocorre na tradução das alterações climáticas nas séries de dados que vão funcionar como dados de entrada em modelos hidrológicos (ex.: modelos de balanço hídrico) ou de análise de impactos. Na maioria dos casos usam-se séries de precipitação alteradas de acordo com os resultados dos modelos climáticos como dados de input de modelos hidrológicos, mas este tipo de séries “alteradas” não permite definir os efeitos das alterações na variabilidade do clima; por outro lado a incorporação de modelos climáticos para gerar séries estocásticas de precipitação diárias nas condições climáticas actuais e futuras permite a análise da variabilidade mas podem por vezes mostrar-se muito pouco eficazes na criação de séries de precipitação realistas (Arnell, 1999). Assim, segundo este autor, o processo de criação de séries diárias de dados pode ter influência muito importante na “credibilidade” das alterações simuladas.

Uma outra fonte de incerteza é a utilização de dados discretos para o registo de eventos altamente transientes (ex.: recarga de aquíferos), podendo levar a uma grande perda de informação (Timlin *et al.*, 2000); por exemplo, o uso de registos contínuos de variação dos níveis piezométricos para o cálculo da recarga, detecta respostas muito rápidas aos eventos de precipitação em aquíferos muito superficiais e a ocorrência de recargas episódicas muito significativas, que não eram detectadas com os dados de precipitação e evapotranspiração ou variações dos níveis piezométricos normalmente usados na estimativa da recarga (Timlin *et al.*, 2002). A este nível, Bekesi e McConchie (1997) realizaram o cálculo da recarga regional na região de Manawatu, Nova Zelândia, usando a recarga média anual e métodos de Monte Carlo, calculando a incerteza associada. Usando uma distribuição aleatória dos parâmetros de humidade do solo para modelar a variabilidade intrínseca do meio e calculando a recarga em 300 simulações para cada estação, a incerteza da recarga foi expressa pelo desvio padrão da recarga média anual. A sensibilidade dos resultados da recarga face aos dados de entrada do modelo foi calculada pelo método de regressão linear segundo os mínimos quadrados, sendo a sensibilidade dada pelo valor do coeficiente de regressão estandardizado segundo o método dos mínimos quadrados.

Segundo Hulme e Carter (1999 in Carter *et al.*, 1999) além das incertezas referentes aos modelos climáticos, existe um conjunto de incertezas associadas aos estudos de impacto das alterações climáticas e algumas formas de quantificar estas incertezas são:

- Avaliação de especialistas;
- Experimentação/modelação sob condições controladas;
- Comparação dos erros resultantes das simulações dos modelos de impacto;
- Comparação da resposta dos modelos a alterações artificiais do clima;
- Comparação das diferenças entre estimativas dos modelos de impacto;
- Estudo de cenários não climáticos e de adaptação.

A incerteza pode ser tratada dos seguintes modos (Hulme e Carter, 1999):

- **Supressão das incertezas** – muito arriscado, dado que a incerteza é uma componente essencial destes fenómenos;
- **Incorporar as incertezas dos modelos** – por exemplo a partir da escolha dos modelos mais apropriados, indicando sempre as condicionantes que levaram à escolha do(s) modelo(s) e as limitações associadas a este(s) mesmo(s) modelo(s) e/ou escolhendo diversos modelos apropriados e comparar resultados;
- **Transparência na apresentação das incertezas** – que é na realidade a comunicação e justificação das escolhas que afectam os resultados dos cenários considerados;
- **Avaliação de especialistas;**
- **Quantificação formal da incerteza** – algumas das ferramentas mais utilizadas são a estatística bayesiana, as simulações de Monte Carlo, etc. Os

cenários que combinam as incertezas baseados na lógica bayesiana oferecem a oportunidade para expressar as alterações climáticas em termos de probabilidade em vez de apenas em termos de intervalos de valores, permitindo aos estudos de impacto expressar o impacto destas alterações em termos de risco (Hulme e Carter 1999 in Carter *et al.*, 1999).

Sendo de realçar as seguintes técnicas de análise da incerteza (Katz, 2001) :

- **Análise de sensibilidade** – não apropriada para modelos fortemente não lineares;
- **Análise de cenários** – muito utilizada nos estudos de alterações climáticas globais, embora possa não ser adequada para análise da incerteza dos resultados/previsões dos modelos;
- **Análise de simulações de Monte Carlo** – na generalidade têm-se centrado na questão das incertezas associadas aos parâmetros e dados de entrada, ignorando possíveis imperfeições das estruturas dos modelos, e/ou analisando versões menos complexas destes (ex.: ciclo global de carbono de Enting-Lassey) em vez de analisar a questão da incerteza dos próprios modelos climáticos globais, dada a grande complexidade desta análise.

Visser *et al.* (2000), para definir que fontes de incertezas devem incluir-se nas previsões de alterações climáticas, o ganho obtido se se reduzirem dadas fontes de incerteza, se existe uma parametrização simples entre emissões e incerteza e se a escolha de um ano de base influencia ou não os resultados, usaram um **modelo de avaliação integrada DIALOGUE**, de estrutura modular, em que as alterações climáticas são calculadas pela activação de uma cadeia de módulos, onde cada módulo tem vários modelos paralelos de simulação de cada um dos processos envolvidos nas alterações climáticas, de modo a que um gere uma estimativa elevada, outro uma estimativa média e o terceiro uma baixa estimativa da variável em cálculo. Os módulos considerados são:

- módulo de emissões, com 15 cenários de emissões;
- módulo do ciclo dos gases, com 20 modelos para 7 gases de efeito de estufa (CO₂, CH₄, NO₂, diversos CFC's, metil-clorofórmio e HCFC's);
- módulo do “forcing” radiactivo, com 3 modelos para os 7 gases de efeito de estufa;
- módulo do clima, onde se consideram 5 modelos baseados nos modelos de Box-Uppwelling-Diffusion.

Outra abordagem da incerteza é o recurso a técnica de “downscaling”, a ser aplicadas a todos os resultados hidrológicos relevantes dos modelos climáticos globais²⁸, visto os resultados dos modelos climáticos globais terem resolução muito grosseira à escala da bacia hidrográfica e/ou do aquífero, dificultando a análise dos

²⁸ Ou, em alternativa, a utilização de Modelos Climáticos Regionais (RCM's).

impactos sobre o ciclo da água. Existem duas metodologias de “downscaling” (Bárdossy, 2000 in Beersma *et al.*, 2000):

- **O “downscaling” dinâmico** – utiliza modelos climáticos regionais acoplados para simular condições a escala mais detalhada a partir das condições atmosféricas variáveis ao longo do tempo obtidas a partir dos modelos climáticos globais. Se este método fornece variáveis hidrológicas consistentes a escalas mais detalhadas não permite contudo a análise da incerteza. Para os estudos de impactos costeiros as metodologias de “downscaling” dinâmico são actualmente as ferramentas mais aconselháveis (Beersma, 2001 in Planton *et al.*, 2001).
- **O “downscaling” empírico ou estatístico** – estes métodos baseiam-se no uso de observações locais para estimar as funções “downscaling” mais correctas para a situação em análise; estes métodos consideram que as relações estatísticas entre as características a larga escala e as a escalas inferiores se mantêm mesmo em condições de alterações climáticas. Estas metodologias permitem não apenas avaliar as incertezas associadas mas também analisar detalhes não possíveis de ser analisados pelas técnicas dinâmicas. Neste tipo de técnicas incluem-se: (1) regressão; (2) probabilidades condicionais; (3) reamostragem.

3.2. Avaliação do Estado dos Conhecimentos sobre os Impactos das Alterações Climáticas em Portugal Continental e nos Açores

A questão das alterações climáticas, sobretudo no que concerne às alterações climáticas recentes apresenta-se ainda numa fase de desenvolvimento no que concerne a Portugal e às Regiões Autónomas dos Açores e Madeira. Neste capítulo há ressaltar os trabalhos do Projecto SIAM, na área do clima e impactos gerais, que prevêem para o Continente português (Comissão Nacional para as Alterações Climáticas, 2001; SIAM, 2001 e SIAM, 2002):

- Aumento da temperatura entre 4 a 7 °C, para o período de 2000 a 2100, o que é um aumento superior às previsões do IPCC para a média global, de acordo com os resultados de vários modelos climáticos globais (C.A.C. 2001);
- Tendência para o decréscimo da precipitação na maior parte do País²⁹, tendendo a redução a ser mais acentuada nas regiões centro e sul e com leve incremento na zona NW (Minho);
- Alteração na distribuição do padrão mensal de precipitação, com decréscimo substancial nos valores totais de Primavera ($\approx 30\%$) e Outono (35-60%) e um aumento nos valores de Inverno (20-50%), o que pode sugerir uma evolução no sentido de eventos de precipitação mais concentrada;
- Probabilidade significativa (grau de confiança de 67% a 95%) de decréscimo do escoamento de Verão, da disponibilidade hídrica e humidade no solo,

²⁹ Da ordem de 100 mm (valor médio anual, relativo à totalidade do país).

tornando o país tendencialmente mais seco. Admite-se o aumento da variação sazonal do escoamento;

- A tendência para um clima mais seco causará a redução do volume de recarga de aquíferos, provocando o agravamento dos problemas de qualidade da água. Ao mesmo tempo as necessidades de água para irrigação aumentam, as áreas de cultivo tendem a deslocar-se para norte, e as culturas de sequeiro podem também ser ainda afectadas.
- Decréscimo da produtividade agrícola, em particular no sul (grau de confiança de 33 a 67%), pois embora o aumento das concentrações de CO₂ possa estimular o crescimento das plantas, este crescimento está dependente da água disponível que, caso se torne inferior aos valores actuais, pode gerar o efeito de quebra real de produtividade;
- Possível subida do nível médio das águas do mar, estimada entre 25 e 110 cm, podendo levar à perda de até 67% da área actual das zonas costeiras;
- Aumento (grau de confiança de 33 a 95%) do risco de cheias e, nas regiões litorais, do risco de erosão;
- Aumento substancial da perda de áreas húmidas, com subsequentes impactos nas infra-estruturas humanas, turismo, indústria, agricultura e habitats naturais das zonas costeiras.

Usando um dos vários GCM (Global Climate Models) do Hadley Centre Model, e três cenários de emissão de gases de efeito de estufa, Mitchell *et al.* (1999) e Meteorological Office (1999) prevêem para os Açores:

➤ **Temperatura:**

- *Cenários 1 (estabilização das emissões a 750 ppm) e 2 (estabilização das emissões a 500 ppm)* – subida de temperatura média de 1 a 2 °C;
- *Cenário 3 (não estabilização das emissões de gases de estufa)* – subida de 2 a 3 °C da temperatura média.

➤ **Precipitação:**

- *Cenários 1 e 2* – redução da precipitação para a região dos Açores entre 0 a 0,3 mm/dia;
- *Cenário 3* – redução da precipitação para a região dos Açores entre 0,5 e 1 mm/dia.

Estudos mais detalhados sobre as alterações climáticas para os Açores foram realizados por SIAM (2005, *in press*), que apontam para uma subida da temperatura máxima de +0,049 °C/década (período 1900-2002), registando-se o aumento desta tendência a partir de 1975 (+0,46 °C/década); na precipitação de Inverno há uma descida média de -7,3 mm/década (período 1901-1994), aumentando esse decréscimo (-52 mm/década) para o período 1968-1993.

Dos estudos relativos aos impactos das alterações climáticas podem citar-se:

- *Dias e Tabor da (1988) e (1992)* – estudo da subida do nível do mar para Portugal Continental, determinado tendências de alteração do nível do mar

para o período até 2100. Os seus resultados foram incorporados posteriormente no estudo SIAM;

- *Lobo Ferreira (1991)* – estudo para a ilha de S. Miguel (Açores) sobre o impacto das alterações nos valores da precipitação sobre a recarga de aquíferos³⁰;
- *Brandão et al. (2000)* – estudo das precipitações extremas para Portugal Continental, incluindo a distribuição espacial das precipitações e eventos extremos;
- *DROTRH e IA (2001)* – apresenta, baseado no estudo de *Azevedo e Gonçalves (1993)*, a evolução da temperatura e precipitação, de 1874 a 1992 (estação de Angra do Heroísmo), definindo uma tendência de descida da temperatura média, mínima e máxima³¹; para a precipitação assinalam uma tendência de **subida** (sem definirem valores). Faz ainda referências gerais à possível subida do nível do mar, erosão costeira e alteração dos regimes torrenciais;
- *Plano Regional da Água dos Açores (2001)* – apresenta indicações qualitativas sobre problemas que possam ocorrer com a subida do nível do mar, e uma análise para a ilha Terceira das tendências evolutivas da precipitação e temperatura desde 1874 a 1992, de acordo com o estudo desenvolvido por *Azevedo e Gonçalves (1993)*.

3.3. Avaliação do Estado dos Conhecimentos sobre a Hidrogeologia e Recursos Hídricos dos Açores

Os recursos hídricos subterrâneos das ilhas dos Açores diversos foram alvo de vários estudos, realçando-se os realizados pela Universidade dos Açores, assim como alguns estudos feitos pelo LNEC para esta região autónoma.

A **caracterização climatológica geral**, realizada pelo Instituto de Meteorologia através da sua rede de monitorização, é complementada pelos estudos:

- *Coutinho (1990)* – caracteriza a precipitação e evapotranspiração no maciço das Sete Cidades (S. Miguel);
- *Lobo Ferreira (1991)* – caracteriza a precipitação quanto a valores médios anuais e distribuição de isoietas (valores médios anuais) para toda a ilha de S. Miguel;
- *Cruz (1992)* – caracteriza a precipitação da ilha de Santa Maria em médias mensais e anuais, define os valores para classificar anos secos e húmidos, estabelece uma relação geral entre a precipitação e a altitude e apresenta a distribuição das isoietas médias para a totalidade da ilha (série de 1955-1978); caracteriza a temperatura e evapotranspiração, estabelecendo índices de aridez, humidade e hídricos e o balanço hídrico ao nível do solo, estabelecendo a classificação de Thornthwaite para zonas de influência das estações de Fontinhas, S. Pedro e Aeroporto;

³⁰ Para as zona dos Picos uma redução de 25% da precipitação implicaria uma redução de 75% da recarga média anual.

³¹ Muito menos acentuada para as temperaturas máximas do que para as mínimas.

- *Rodrigues (1993)* – caracteriza a climatologia da ilha Terceira quanto à temperatura, precipitação, ventos e humidade do ar, apresentando climodiagramas para vários pontos da ilha sites a distintas altitudes;
- *Rodrigues (1995)* – estabelece um mapa de distribuição de precipitação média anual (assim como de valores médios anuais para ano seco e ano húmido) para a ilha de S. Miguel. Calcula também valores mensais médios de evaporação nas Lagoas das Sete Cidades, Furnas e Congro;
- *Cruz (1997)* – realiza, para a ilha do Pico, um estudo similar ao efectuado para a ilha de Santa Maria, calculando a média (e volume) de precipitação anual para o Planalto da Achada e Montanha do Pico, os anos secos e húmidos para as séries de 1974 a 1996 e a distribuição dos valores médios das precipitações ao longo do ano;
- *Azevedo (1998)* – realiza, para a ilha das Flores, uma caracterização da temperatura, precipitação, humidade e ventos, estabelecendo correlações precipitação/altitude e precipitação/distância ao mar, definindo os valores médios anuais de precipitação para toda a ilha e para os três sectores em que foi dividida;
- *Pereira (2000)* – faz a caracterização muito geral da temperatura, humidade, vento e nebulosidade para a ilha de S. Jorge (ano de 1988). A caracterização da precipitação é feita a partir do trabalho de Bettencourt (1979);
- *Novo et al. (2001)* – faz uma caracterização climatológica genérica para as 9 ilhas dos Açores, centrada em exclusivo na distribuição geral da precipitação e temperatura a por ilha; faz uma primeira tentativa de sistematização das unidades hidrogeológicas produtivas versus clima;
- *O Plano Regional da Água dos Açores (2001)* – realiza uma caracterização global e genérica do clima para todo o arquipélago dos Açores, apresentando: (1) valores médios de temperatura, (2) distribuição espacial das precipitações médias anuais, (3) distribuição espacial da evapotranspiração potencial, (4) evapotranspiração real com valores em mm ilha a ilha;
- *Pinheiro (2001)* – realiza a caracterização de dados meteorológicos diários para a ilha Terceira, verificando não existirem diferenças climáticas, em termos estatísticos, entre a Primavera e o Outono;
- *Silva (2003)* – caracteriza, para as ilhas Graciosa e S. Jorge, a temperatura, ventos, nebulosidade, humidade, evapotranspiração e outros parâmetros importantes para a definição climática destas duas ilhas;
- *Arruda (2004)* – caracteriza, para as ilhas do Faial e do Pico, a temperatura, ventos, humidade, nebulosidade, evapotranspiração e assim como aspectos orográficos importantes para a definição climática destas ilhas;
- *Fernandes (2004)* – caracteriza, para as ilhas de S. Miguel e Santa Maria, os ventos, nebulosidade, temperatura, humidade, evapotranspiração e alguns outros parâmetros importantes na definição climática destas ilhas.

No âmbito da **modelação climática** citam-se:

- *Agostinho (1938)* e *Agostinho (1941)* – definiu os primeiros modelos simplificados da distribuição de valores médios anuais de precipitação em

função da altitude. São modelos lineares simples, sem condições para previsões pormenorizadas espaço-temporal da distribuição das precipitações médias. Nestes trabalhos fazem-se ainda referências gerais à sazonalidade climática;

- *Rodrigues (1995)* – caracteriza os parâmetros condicionantes da precipitação da ilha de S. Miguel e define uma metodologia para em função deles obter a distribuição do campo de precipitação e a distribuição geral da precipitação média anual. Cria ainda metodologia de análise da evaporação em lagos endorreicos de altitude³²;
- *Azevedo (1996)* – desenvolve um modelo climático regional (modelo CIELO) que modela os campos da temperatura e humidade do ar por mecanismos adiabáticos, pressupondo a conservação da massa e energia implícita no efeito de Foehn; os campos de precipitação modelam-se tendo em conta a separação entre a precipitação regional (observada junto ao litoral e admitida como igual para um determinado intervalo de tempo em todo o território) e a de origem orográfica. A precipitação orográfica modela-se a partir da capacidade do relevo induzir condensação no seio da lâmina de ar húmido em percurso sobre o território à velocidade, direcção e sentido do vento observado;
- *Rodrigues (2002 a)* – realiza a caracterização geral, com base no modelo CIELO, da climatologia da ilha Terceira.

A **precipitação oculta**, é analisada em:

- *Rodrigues (1995)* – define, para a ilha do Pico, regiões de potencial interessante para estudos de determinação e captação dos volumes deste tipo de precipitação;
- *Dias (1996)* – faz a análise do controle da vegetação natural dos Açores sobre a precipitação oculta;
- *Azevedo (1998)* – procurou estabelecer uma metodologia de análise e uma primeira determinação geral desta componente da precipitação para a ilha das Flores;
- *Rodrigues (2002 a)* – apresenta valores de precipitação oculta nos maciços de Santa Bárbara e Guilherme Moniz;
- *Rodrigues et al. (2002)* – analisa os efeitos da composição química da precipitação difusa sobre a vegetação, mais especificamente sobre a *Cryptomeria japonica*;
- *Rodrigues e Rodrigues (2002)* – realiza a análise isotópica das águas das chuvas, com vista à sua caracterização.

No campo da **hidrogeologia dos Açores** há a citar:

- *Coutinho (1990)* – descreve o comportamento hidrogeológico qualitativo dos vários materiais vulcânicos (Maciço das Sete Cidades - S. Miguel), sem aplicação imediata às várias unidades geológicas; apresenta valores de caudais de nascentes, o estudo das suas curvas de esgotamento e define

³² Sendo os casos de estudo as lagoas do Congro, Furnas e Sete Cidades.

reservas para 13 nascentes. As análises isotópicas permitiram determinar zonas prováveis de recarga e as diferentes origens das águas destas nascentes;

- *Lobo Ferreira (1991)* – estabelece um modelo hidrogeológico conceptual para a ilha de S. Miguel, definindo zonas onde se infiltram e armazenam as águas subterrâneas;
- *Cruz (1992)* – caracteriza a hidrodinâmica da ilha de Santa Maria, apresentando valores de transmissividades médias das formações interceptadas por alguns furos, de coeficientes de esgotamento de nascentes, o volume de água armazenado acima do nível de drenagem, determinando que não há relação entre o caudal e as altitudes das nascentes; foi ainda determinado o desfasamento entre as precipitações e os respectivos caudais de resposta de algumas nascentes, a origem das suas águas e as formações com maior potencial hidrogeológico;
- *Menezes (1993)* – faz a identificação a caracterização dos aquíferos da ilha Terceira, agrupando-os por tipo (superficiais, profundos, suspensos, de base, etc.) e famílias, definindo qualitativamente as características gerais de cada família e fazendo uma descrição qualitativa de cada aquífero (profundidade, produtividade, nascentes que origina, susceptibilidade à estiagem e formações geológicas em que se desenvolve. Caracteriza as nascentes em difusas e pontuais, de contacto, fissura, arriba, etc., indicando ainda a sua produtividade (caudal fraco, elevado, etc.);
- *Rodrigues (1993)* – realiza, para a ilha Terceira, uma caracterização hidrogeológica qualitativa para as várias formações, dos aquíferos suspensos e de base; para os aquíferos suspensos enumera as suas espessuras, formações geológicas, aspectos do seu funcionamento (sem serem indicados quaisquer parâmetros hidrodinâmicos), as nascentes que lhe estão associadas e respectivos caudais;
- *Cruz et al. (1993)* – define, com base em estudos isotópicos, origens prováveis das águas da ilha de Santa Maria, e os diferentes tempos de permanência para distintas nascentes;
- *Rodrigues (1995)* – faz, com base em estudos isotópicos de nascentes do Maciço das Sete Cidades, e águas das chuvas, uma classificação das nascentes em três grupos de circuitos hidráulicos, com diferentes influências geotérmicas. Estabelece ainda, com base nestes estudos, uma relação entre a lagoa das Empadadas e os poços dos Pico e possíveis influências das principais lagoas sobre várias nascentes deste Maciço, definindo um zonamento isotópico de três áreas (função da localização geográfica dos pontos de água e velocidade da recarga) e o esquema simplificado dos principais sistemas de circulação/descarga subterrânea;
- *Coutinho et al. (1996)* – apresentam para o Maciço das Sete Cidades uma discussão mais detalhada das origens das águas, suas idades e possíveis processos de mistura com águas superficiais (lagoas);
- *Novo et al. (1997)* – fazem a caracterização hidrogeológica das formações do aquífero do Cabrito, estabelece o modelo conceptual de circulação, volumes de caudais totais anuais das nascentes, permeabilidade, porosidade eficaz, espessura saturada nos períodos de Inverno e de estiagem, e tempos de permanência das águas no aquífero;

- *Cruz (1997)* – faz, para a ilha do Pico, a caracterização hidrodinâmica, incluindo a análise da piezometria e seus gradientes (no caso do aquífero de base), a relação entre a altitude dos furos e sua profundidade, parâmetros hidrodinâmicos do aquífero de base (transmissividades, caudais específicos, difusividade hidráulica e coeficiente de armazenamento), o efeito da influência da maré no aquífero de base e a correlação entre a difusividade e a distância dos pontos de água ao mar;
- *Azevedo (1998)* – descreve, para a ilha das Flores, as características hidrogeológicas das formações (permeabilidade, porosidade e capacidade de armazenamento – sem valores quantitativos, excepto no aquífero de base, onde define intervalo de valores de permeabilidade). Define um modelo hidrogeológico conceptual de circulação e funcionamento, que inclui a descrição dos processos hidrodinâmicos dominantes em cada zona, o tipo de nascentes e o tipo de armazenamento hídrico tanto na zona saturada como na zona não saturada;
- *Coutinho (2000)* – realiza a caracterização hidrogeológica da ilha do Faial baseada nos estudos isotópicos das suas nascentes;
- *Pereira (2000)* – faz uma caracterização qualitativa da permeabilidade dos materiais piroclásticos e lávicos da ilha de S. Jorge;
- *Cruz e Silva (2001)* – fornece as transmissividades de vários furos da ilha do Pico, as frequências dos valores de transmissividades e difusividade hidráulica e distribuição de cloretos;
- *Novo et al. (2001)* – definiram para as 9 ilhas dos Açores o tipo de aquíferos, permeabilidades, regiões de escoamento, províncias e unidades hidrogeológicas; definiu um esboço de modelo hidrogeológico conceptual, a descrição genérica e qualitativa das potencialidades aquíferas das formações, tentando definir as respectivas espessuras, parâmetros hidrodinâmicos, recargas e balanços hídricos;
- *O Plano Regional da Água dos Açores (2001)* – identifica os aquíferos das 9 ilhas e parâmetros hidrodinâmicos (transmissividade, permeabilidade, caudais específicos);
- *Rodrigues (2002 a)* – analisa as origens das águas dos vários sistemas aquíferos da ilha Terceira e a sua caracterização hidrogeológica a partir dos estudos isotópicos das águas de nascentes, poços e furos destes sistemas aquíferos;
- *Fontes e Pereira (2003)* – faz a quantificação da erosão hídrica em solos vulcânicos, relacionada com o uso do solo.

Entre os **inventários de pontos de água e estudos de qualidade das águas**, citam-se:

- *Paradela (1980)* e *Paradela (1982)* – fez um inventário das nascentes das 9 ilhas dos Açores, referenciando os valores globais de caudais por concelho;
- *Azevedo et al. (1986)* – faz o inventário das nascentes do concelho de Praia da Vitória, definindo para cada: localização, altitude, caudal e temperatura da

água, descrição e classificação (pontual ou difuso), tipo de captação, condições sanitárias e tipo de consumo;

- *Coutinho (1990)* – realiza o inventário de nascentes, furos e lagoa³³ do Maciço das Sete Cidades, incluindo a descrição geológica e ocupação do solo da área de ocorrência e as características físico-químicas das águas, fácies hidroquímicas, qualidade para uso agrícola, análise das relações entre espécies químicas, definição dos equilíbrios água/rocha, definindo subgrupos de afinidade entre as águas e a origem das mesmas;
- *Lobo (1991)* – faz o levantamento geral dos problemas criados pelos nitratos de origem agro-pecuária. Trata-se de um trabalho teórico mas importante, dada a importância da actividade agro-pecuária na agricultura do arquipélago;
- *Cruz (1992)* – fornece a amostragem dos parâmetros físico-químicos de 32 pontos de água da ilha de Santa Maria e respectiva análise das fácies hidrogeoquímicas e relações entre espécies químicas, definição dos equilíbrios água/rocha, qualidade da água para uso doméstico e para uso agrícola, análise da contaminação por nitratos/actividades agrícolas, definição de origens/tempos de residência;
- *Rodrigues (1993)* – realiza o inventário geral de nascentes e furos da ilha Terceira, agrupando as nascentes por altitudes e unidade geológica de ocorrência; apresenta os caudais totais para cada grupo de nascentes e as características gerais de profundidade e caudal dos furos. Faz ainda referência ao número total de poços por concelho, por classe de altitude e, nalguns casos, o aquífero captado por cada grupo de poços;
- *Lobo (1993)* – faz o levantamento de nascentes e outros pontos de água³⁴, para todas as ilhas dos Açores, referenciando a sua zona de ocorrência, qualidade das águas de abastecimento, parâmetros físico-químicos comuns e parâmetros bacteriológicos;
- *Cruz (1997)* – elabora o inventário de pontos de água para toda a ilha do Pico (furos, poços de maré e nascentes), sendo referenciada cartograficamente a sua localização, fácies e parâmetros hidroquímicos e hidrodinâmicos, equilíbrios água/rocha, idade e origem das águas, além duma análise pioneira da mistura da água do aquífero de base com a do mar e intrusão salina;
- *Azevedo (1998)* – faz o inventário de pontos de água da ilha das Flores e caracterização físico-química³⁵ por grupo de pontos de água, partindo para a definição de processos responsáveis pela mineralização das águas, sua evolução e respectivas causas, fácies hidroquímica, equilíbrio água/rocha, correlações entre índices químicos e efeitos da acção humana e contaminação marinha e/ou vulcanogénica no quimismo das águas;
- *Coutinho (2000)* – faz a caracterização hidroquímica dos pontos de água da ilha do Faial, em termos hidroquímicos e isotópicos;
- *Pereira (2000)* – realiza o levantamento de pontos de água para a ilha de S. Jorge, incluindo os parâmetros físico-químicos vulgares, geologia e as

³³ Que funciona como fonte de abastecimento doméstico.

³⁴ Além de fontanários e outros pontos de abastecimento público.

³⁵ Temperatura, condutividade, Eh, pH, Oxigénio dissolvido, Alcalinidade, Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, NO₃⁻, Cl⁻, HCO₃⁻, SO₄²⁻, Si, fosfatos.

condições gerais da captação, além duma caracterização físico-química (temperatura, condutividade, resíduo seco, pH, cloretos) e duma relação entre caudais, condutividades e pH;

- *Novo et al. (2001)* – reúne os dados de um inventário para as 9 ilhas dos Açores, indicando localização, geologia, hidrodinâmica e qualidade, baseado em bibliografia e trabalho de campo (Corvo, Flores, Graciosa, Santa Maria) e do qual resultou uma base de dados. Foi ainda apresentado um inventário das águas minerais referenciadas na bibliografia;
- *Centro de Saúde de S. Roque do Pico* – faz o inventário com localização dos pontos de água e sua caracterização física, altitude, caudal, estado de protecção e conservação e tipo de ponto de água;
- *O Plano Regional da Água dos Açores (2001)* – apresenta o inventário actualizado dos pontos de água nas 9 ilhas do arquipélago, aumentando o número conhecido dos mesmos³⁶, com a sua localização cartográfica e caracterização em base de dados e relatórios técnicos parcelares. Apresenta uma caracterização genérica das cargas poluentes de origem pecuária (CBO, fosfatos e azoto) e fertilizantes de origem agrícola embora sem diferenciação quanto às cargas que atingem os reservatórios superficiais versus os que atingem os reservatórios subterrâneos; caracteriza ainda a qualidade das águas em termos de usos (referenciados aos limites VMA e VME) e assinala que os principais problemas de qualidade das águas subterrâneas são os da intrusão salina e excesso de nitratos, assinalando ainda problemas de poluição difusa e pontual;
- *Rodrigues (2002 a)* – faz um inventário dos pontos de água associando-os a cada um dos sistemas aquíferos da ilha Terceira;
- *Lobo et al. (2002)* – apresenta um inventário dos pontos de água da ilha do Corvo, com vista à análise da vulnerabilidade dos aquíferos desta ilha;
- *Melo (2005)* – faz um inventário dos pontos de água da ilha Terceira, incluindo os furos geotérmicos;
- *Teixeira (2005)* – faz um inventário dos recursos hídricos subterrâneos, com recurso aos métodos geofísicos eléctricos.

Quanto à questão das **recargas e consumos** o estado do conhecimento é o seguinte:

- *Coutinho (1990)* – definiu valores de recarga para o Maciço das Sete Cidades, pelo método de Coutagne, fazendo uma análise da evapotranspiração;
- *Lobo Ferreira (1991)* – estudou a recarga para Lagoa das Furnas, Região dos Picos, Ribeiro Sanguinhal e Ribeiro Quente (S. Miguel), indicando ainda a percentagem de precipitação escoada pelas nascentes. Faz um inventário dos volumes captados e distribuídos nos concelhos de Povoação, Nordeste, Lagoa e Ponta Delgada;
- *Cruz (1992)* – definiu o balanço hídrico para Santa Maria (área do Aeroporto) pelo CEGEVAP (modelo de balanço hídrico sequencial mensal) e BALSEQ

³⁶ Para S. Miguel referenciou 450 pontos de água contra os cerca de os 200 anteriormente conhecidos.

(modelo de balanço hídrico sequencial diário); usa o método dos cloretos para determinar a recarga na nascente de Santana;

- *Rodrigues (1995)* – definiu um modelo de cálculo do escoamento superficial em maciços fracturados vulcânicos (caso de estudo: maciço da Povoação, ilha de S. Miguel), aplicando-o a três ribeiras³⁷, obtendo os respectivos escoamentos mensais. Analisou curvas de recessão na ribeira do Guilherme para determinar a depleção dos respectivos aquíferos;
- *Cruz (1997)* – definiu a recarga para o Planalto da Achada, pelo balanço de cloretos, e pelo utilizado método usado pela Hidrotécnica Portuguesa (1986); não avaliou a recarga na Montanha do Pico;
- *Novo et al. (1997)* – calculou a recarga na caldeira do Cabrito (ilha Terceira) pelo método BALSEQ, os consumos das freguesias do concelho de Angra do Heroísmo satisfeitos por esta região e estabeleceu o respectivo balanço recargas/consumos;
- *Azevedo (1998)* – fez, para a ilha das Flores, uma análise detalhada da precipitação, precipitação oculta, escoamento hídrico superficial, retenção superficial nas lagoas e na vegetação, infiltração, armazenamento hídrico e percolação hídrica (onde incluiu a recarga aquífera). A retenção na vegetação calculou-se pelos dados de campo do *Sphagnum*; a retenção nas lagoas obteve-se pelo balanço entre precipitação em cada lagoa e escoamento médio de toda a zona onde cada uma se encontra; o escoamento superficial foi determinado por zona da ilha, a partir de observações de campo com molinete que determinaram coeficientes de escoamento superficial; a infiltração e armazenamento hídrico determinaram-se a partir de ensaios de percolação; a recarga e a percolação hídrica calcularam-se por um modelo de balanço desenvolvido pelo autor. No caso da recarga³⁸ foi ainda aplicado o método dos cloretos, para calibrar o modelo de balanço desenvolvido pelo autor;
- Os *inventários das Câmaras Municipais* – apresentam indicações muito valiosas e mais ou menos actualizadas sobre os volumes de consumos;
- *APDA (1999)* – sintetiza esta informação, muitas vezes dispersa pelos municípios. Em grande parte dos concelhos insulares estes consumos estão em função dos usos (doméstico, industrial, agrícola), embora nalguns casos se conheça apenas o volume total de consumos por conselho. A agricultura é o sector onde os consumos são mais mal conhecidos;
- *Novo et al. (2001)* – calculou recargas globais para as 9 ilhas dos Açores, pelo modelo BALSEQ, calibrando-as, quando possível, com valores obtidos por outros métodos e por outros autores; a partir daqui atribuíram-se valores de recarga para cada unidade hidrogeológica, das 9 ilhas. Inventariou os consumos com informação das câmaras municipais, complementada pelos dados de APDA (1999), definindo taxas de exploração dos recursos hídricos subterrâneos, os quais são inferiores à realidade, devido à escassez de informação sobre consumos agrícolas;
- *Plano Regional da Água dos Açores (2001)* – calculou a recarga para a maior parte dos sistemas aquíferos definidos para as 9 ilhas do Arquipélago, com

³⁷ Ribeira dos Bispos, Ribeira do Faial da Terra, do Guilherme.

³⁸ Calculada para a totalidade da ilha e para as três zonas hidrogeológicas em que o autor a dividiu.

lacunas nas Graciosa e Faial, de Santa Maria, Pico e Corvo, apresentando valores máximos e mínimos para a totalidade dos Açores, taxas máximas e mínimas de recarga global por ilha. Definiu um valor aproximado das reservas subterrâneas e disponibilidades hídricas para a totalidade dos Açores e disponibilidades hídricas globais por ilha. Dá conta, por concelho, das necessidades de água (usos doméstico, agrícola, turismo, energia, etc.), origens das águas de abastecimento (número e tipos de captação), consumos, volumes de necessidades e o balanço necessidades/disponibilidades³⁹;

- *Rodrigues (2002 a)* – realizou os balanços hídricos para a ilha Terceira, calculando as respectivas recargas;
- *Quadros (2002)* – fez a análise dos consumos em Angra do Heroísmo;
- *Cota (2003)* – procurou realizar a definição de zonas de recarga no sector noroeste da ilha Terceira;
- *Rodrigues (2002 b)* – fez a modelação das relações entre os recursos hídricos e os diferentes usos do solo da região do Complexo Central da Terceira.

A **vulnerabilidade dos aquíferos à poluição**, é analisada nos seguintes trabalhos:

- *Delgado Rodrigues e Jorge (1990)* - estudo pioneiro, definindo 3 zonas de protecção de captações para as condições de S. Miguel, com base na legislação então vigente, realizando a aplicação prática deste zonamento a 4 nascentes;
- *Novo et al. (2001)* – define a vulnerabilidade à poluição para as 9 ilhas dos Açores por um método baseado na metodologia EPPNA, modificado para as condições insulares;
- *O Plano Regional da Água dos Açores (2001)* - apresenta, na Versão para Discussão Pública, uma indicação dos riscos de poluição que podem afectar os Açores;
- *Lobo et al. (2002)* – faz a análise da vulnerabilidade dos aquíferos da ilha do Corvo;
- *Cota (2003)* – realiza estudos no sentido da definição da vulnerabilidade dos aquíferos do sector noroeste da ilha Terceira.

3.4. Áreas de Conhecimento a Necessitar de Futuros Estudos

Do enunciado anteriormente resulta que nas questões do impacto das alterações climáticas, em particular no que respeita a regiões insulares, são ainda numerosas as lacunas de conhecimento relativamente às questões das alterações climáticas e seu impacto nos sistemas naturais e humanos/humanizados. Várias das áreas pertinentes para os impactos das alterações climáticas sobre regiões insulares que necessitam de futuros estudos são, e passam a citar-se:

³⁹ Considera exclusivamente as disponibilidades hídricas subterrâneas.

- Relativamente à **erosão do litoral** em condições de subida do nível do mar, para os litorais de areias é aplicável, para previsões de recuo da linha de costa, e como modelo de base a regra de Bruun. Porém, tanto quanto foi possível apurar da bibliografia consultada e de contactos com especialistas, não são conhecidos modelos de previsão de erosão costeira em condições de subida do nível do mar para litorais de arriba (predominantes na região dos Açores); de referir que Paulo Borges, tem publicados vários trabalhos nesta matéria, de que se salienta a sua tese de doutoramento (Borges, 2003);
- Continua envolta em debate a contribuição que os gelos antárcticos poderão ter para a subida global do nível do mar;
- É difícil a previsão actual da variação de como as alterações climáticas alterarão a frequência dos **fenómenos extremos**, sobretudo os relativos a ciclones, tufões e afins;
- O conhecimento no que respeita aos impactos que a subida do nível do mar tem efectivamente sobre os aquíferos costeiros e aquíferos de base de zonas insulares está ainda pouco desenvolvido. Alguma da bibliografia consultada refere a questão da **intrusão salina** destes aquíferos associada à subida do nível do mar, regra geral de um modo indicativo como uma consequência possível, mas não refere trabalhos práticos realizados sobre este aspecto. A mesma bibliografia pouca referência faz ao desenvolvimento de metodologias de modelação apropriadas para o estudo destes impactos ou a aplicação das metodologias actualmente existentes usadas no estudo de intrusão salina, aplicadas às questões de intrusão em cenários de subida do nível do mar. Como resultado do conhecimento ainda pouco desenvolvido nesta área, Alvarez (1998) refere a necessidade de realizar investigação quanto aos impactos da subida do nível do mar e intrusão salina de aquíferos costeiros;
- São mal conhecidos os impactos das alterações climáticas sobre os recursos hídricos subterrâneos, em particular nos aspectos de **alteração da recarga**. Não se conhece por exemplo como a alteração dos padrões de precipitação e temperatura atmosférica influenciarão a humidade no solo, evapotranspiração e escoamento superficial e portanto a recarga. Sabe-se contudo que não é possível estabelecer o raciocínio linear de “mais precipitação, maior recarga”. De facto os parâmetros que interferem na recarga estão mal estudados do ponto de vista das alterações climáticas e não se tem ideia clara de como eles variam num clima em alteração, ou seja, não se sabe de facto como as alterações climáticas influem na variação/modificação das recargas de aquíferos;
- É mal conhecida a relação entre as alterações climáticas e **alteração na qualidade das águas subterrâneas**. Por exemplo está pouco estudada a degradação da qualidade das águas em aquíferos muito superficiais por um aumento da remoção de água do aquífero por fenómenos de capilaridade e consequente acumulação de depósitos salinos na zona vadosa num cenário de aumento das temperaturas atmosféricas;
- Está também pouco estudado o **impacto na qualidade/risco de poluição das águas subterrâneas perante situações climáticas extremas** (ex.: cheias) e portanto como uma alteração na frequência destes eventos climáticos extremos irá afectar a qualidade/risco de poluição de aquíferos. Os estudos nesta área estão ainda numa fase muito inicial de desenvolvimento;

- Está pouco estudado como as **alterações do coberto vegetal** associadas às alterações climáticas podem influenciar nos regimes de recarga e/ou de impacto na qualidade das águas subterrâneas;
- Está ainda pouco desenvolvida a aplicação focalizada exclusivamente para os Açores de quaisquer modelos climáticos globais para definição de cenários de alterações climáticas, tal como foi aplicado pela equipa do Projecto SIAM a Portugal Continental. O único estudo referido no Plano Regional da Água dos Açores relacionado com **alterações climáticas nos Açores** é uma projecção dos valores de precipitação e temperatura desde 1874 a 1992 apenas para a ilha Terceira, com as relações possíveis de tais dados; deve contudo referir-se os estudos PRAXIS XXI, já evocados anteriormente e que iniciaram a investigação nesta área, para os Açores. Os estudos do Meteorological Office (1999), sendo aplicados à globalidade do planeta – usando o modelo climático global Hadley Centre Model – permitem ter uma ideia da variação dos parâmetros de temperatura e precipitação de um modo muito geral, e apontando apenas um intervalo médio de alterações destes dois parâmetros, mas sem possibilidade de indicação de frequências de valores médios e de eventos extremos. Na prática isto quer dizer que se tem uma indicação genérica de alterações possíveis de precipitação média e temperatura média mas não foram estabelecidos até ao momento cenários de alteração climática para os Açores que dêem projecções, com base em modelos climáticos, das alterações dos padrões de precipitação, em termos de frequência, intensidade e duração dos eventos de precipitação;
- Não existe para os **Açores**, um estudo detalhado que forneça uma indicação de como, em cenários de alterações climáticas, venham a variar a **frequência e intensidade dos fenómenos extremos**, entre os quais as grandes tempestades;
- Não há indicação na bibliografia consultada de até ao momento ter sido realizado **para os Açores** uma **análise sobre a evolução do nível do mar** ao mesmo nível do que já realizado para Portugal Continental, com definição das respectivas tendências de evolução para cada uma das ilhas dos Açores;
- Está mal conhecido o **impacto que a possível alteração do nível do mar terá nos aquíferos ao longo da franja costeira dos Açores** relativamente a: (1) perda de terras litorais para o mar, por fenómenos de inundação, (2) alteração da intensidade da erosão costeira/recuo do litoral por subida do nível do mar, (3) evolução da intrusão salina em aquíferos de base;
- Existe um reduzido conhecimento de como, nos Açores, as alterações nos padrões de precipitação, escoamento superficial e evapotranspiração devidos às alterações climáticas farão variar os valores de **recarga dos aquíferos**;
- Não está definido como, nos Açores, os efeitos das alterações climáticas poderão afectar a **qualidade dos recursos hídricos subterrâneos**;
- É desconhecido nos Açores os impactos dos fenómenos extremos na qualidade dos recursos hídricos subterrâneos, a respectiva **vulnerabilidade** a esses fenómenos, assim como o impacto que a alteração da intensidade e frequência destes fenómenos – devido às alterações climáticas – têm na qualidade das águas subterrâneas;

- Está ainda pouco estudado, nos Açores, a forma como as alterações climáticas afectarão a densidade e distribuição populacional dos ecossistemas naturais; desconhece-se também como as alterações climáticas farão, nos Açores, **alterar os padrões de uso do solo** e como estas alterações – uso do solo e modificações nos ecossistemas – irão influenciar os recursos hídricos subterrâneos tanto do seu ponto de vista quantitativo como qualitativo. De referir contudo que os aspectos da erosão hídrica relacionada com o uso dos solos foi estudada em Fontes e Pereira (2003);
- Não há indicação na bibliografia consultada de até ao momento terem sido aplicados aos Açores **metodologias de avaliação de vulnerabilidade às alterações climáticas e/ou subida do nível do mar** tanto pelas metodologias encontradas na bibliografia (e enunciadas no capítulo 3) como por outras que pudessem ter sido desenvolvidas para a região;
- Não há indicação na bibliografia consultada de até ao momento se terem realizado estudos no sentido de calcular os **consumos em cenários de alteração climática**, sem os quais será muito difícil se não mesmo impossível definir o stress hídrico sobre os recursos subterrâneos em condições de alterações climáticas;
- Relativamente à **hidrogeologia dos Açores** são desconhecidas: (1) muitas das características e parâmetros hidráulicos dos aquíferos, para algumas ilhas; (2) o funcionamento dos aquíferos e ligações hidráulicas entre estes (por exemplo os valores de drenância são no geral desconhecidos); (3) conhecimento pormenorizado da situação da intrusão salina e da localização das interfaces água doce/água salgada para a maior parte das ilhas do arquipélago; (4) localização e extensão das regiões de recarga, para boa parte das ilhas; (5) os consumos, sendo estes de todo desconhecidos nalguns conselhos, assim como os que se referem à agricultura; (6) a localização pormenorizada de todas as fontes de poluição de águas subterrâneas, assim como o seu tipo (pontual, difusa) e espécies poluentes. A necessitar de reavaliação encontram-se os valores de recarga determinados para os aquíferos dos Açores.

Ao nível da avaliação da incerteza houve grandes desenvolvimentos nos últimos anos mas algumas das áreas pouco estudadas (Katz, 2001; Carter e Hulme, 2000 in Cramer *et al.*, 2000) são:

- a aplicação da **análise probabilística de incertezas** aos modelos de alterações climáticas globais – as análises existentes centram-se no geral nas incertezas dos parâmetros e dados de entrada dos modelos **ignorando as imperfeições dos modelos**, sendo que, pela sua alta complexidade estas análises no geral lidam com versões simplificadas dos modelos de alterações climáticas globais;
- **a análise de incerteza dos modelos climáticos globais** – embora os modelos climáticos globais tenham sido utilizados para gerar conjuntos de resultados, ainda não existe potencial computacional para produzir amostras de resultados suficientemente grandes para permitirem uma análise de incerteza destes modelos;
- a aplicação das **estatísticas de extremos à análise dos resultados** dos modelos climáticos – a maioria dos métodos estatísticos usados nas análises

de alterações climáticas globais não fazem uso das estatísticas de distribuição deslocadas para os extremos, usando em vez disso distribuições estatísticas mais comuns, o que pode fazer eivar a previsão de eventos extremos, nomeadamente o cálculo da sua frequência de erros significativos, como por exemplo, considerar certos eventos com frequências de ocorrência mais baixas do que na realidade estes terão;

- a análise da **incerteza aplicada à própria estrutura dos modelos** climáticos globais e da **estimativa dos parâmetros**;
- a análise de como variam as propriedades estatísticas das respostas observadas e modeladas quando sofrem **tratamentos de escala** (“downscaling” ou “scaling up”);
- o **desenvolvimento de relações empíricas ou modelos mais simples** que mostrem comportamento similar aos modelos mais complexos actualmente existentes – estes modelos simplificados podem fornecer a possibilidade de estudos de detalhe das incertezas associadas aos modelos, actualmente impossíveis de realizar devido à insuficiência de recursos computacionais;
- desenvolvimento de novas **metodologias de obtenção de funções de densidade probabilística de cenários futuros** – tal requer entre outros aspectos um aumento das simulações para um maior intervalo de cenários de emissões e para um maior número de situações.

4. IMPACTOS DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS: ALTERAÇÕES NOS PADRÕES DE TEMPERATURA E PRECIPITAÇÃO DEVIDO AO AQUECIMENTO ATMOSFÉRICO GLOBAL

Neste capítulo pretende-se analisar as características do clima da região dos Açores e, com base nos cenários de alterações climáticas elaborados para este arquipélago por SIAM (2003), analisar o comportamento das variáveis precipitação e evapotranspiração com vista à sua futura utilização nos modelos de balanço hídrico. Criando séries de precipitação e de evapotranspiração, alteradas de acordo com tais cenários, e utilizando-as como dados de entrada nos modelos de balanços hídricos pretende-se esboçar uma ideia de como os recursos hídricos subterrâneos poderão evoluir nestes diferentes cenários de alteração climática. A análise dos balanços hídricos será realizada no Capítulo 5.

As alterações climáticas, no caso actual mostrando uma tendência para a subida de temperatura, tenderão a modificar a circulação atmosférica global e afectar os regimes de precipitação. O IPCC (2002) prevê, para o período de 2071-2100 em relação ao período de 1961-1990, um incremento da precipitação nas altas latitudes de 0,25 a 0,5 mm/dia e um decréscimo acentuado nas médias e baixas latitudes que pode ir até aos -2,5 mm/dia no sector atlântico; embora pareçam valores pequenos, quando se compara a evolução ao longo do século XX, as subidas nas altas latitudes atingem cerca de 40% (Escandinávia) enquanto as descidas nas baixas latitudes podem chegar aos 50%. Para o continente português admite-se uma diminuição global da precipitação de 10 a 20% na maior parte do país (embora o extremo NW possa sofrer um incremento de até 10%); esta variação global não é uniforme ao longo do ano, prevendo-se um aumento de cerca de 20-50% no Inverno e uma diminuição em todas as outras estações do ano (> 30% na Primavera, 35 a 60% no Outono, até 75% no Verão), com o número de dias de forte precipitação (> 10 mm/dia) a aumentar e a concentrar-se no período de Inverno (SIAM, 2001).

Para os Açores as análises climáticas indiciam uma evolução algo distinta. IPCC (2002) assinala nesta região uma tendência de subida da precipitação ao longo do século XX da ordem dos 10-20%, também assinalada em Azevedo e Gonçalves (2003 e citado no Plano Regional da Água dos Açores). Curiosamente, os modelos climáticos globais do Meteorological Office (1999) admitem uma redução média da precipitação entre 0,3 e 1 mm/dia, expressando deste modo os problemas de utilização dos modelos globais para definir tendências de evolução local. Além dos problemas de escala (oferecidos pelos modelos globais quando se analisam áreas tão pequenas como as ilhas) deve ter-se em mente as diferenças entre evoluções em curtos períodos de tempo e as evoluções de longo termo. SIAM (2005), para a ilha Terceira, e para o período de observações 1901-1994, ao analisar a evolução ao longo do século XX, nota uma viragem a partir de 1941, com maior amplitude interanual da precipitação de Primavera registada a partir desta data. Para o mesmo período, a precipitação de Inverno sofreu uma tendência de descida de -7,3 mm/década, verificando-se um maior incremento da variabilidade interanual no

Impactos das Alterações Climáticas: Alterações nos Padrões de Temperatura e Precipitação Devido ao Aquecimento Atmosférico Global

período 1961-1990, com um aumento do número de Invernos muito húmidos, o que implica a existência de outros Invernos muito secos (Figs. 12 e 13).

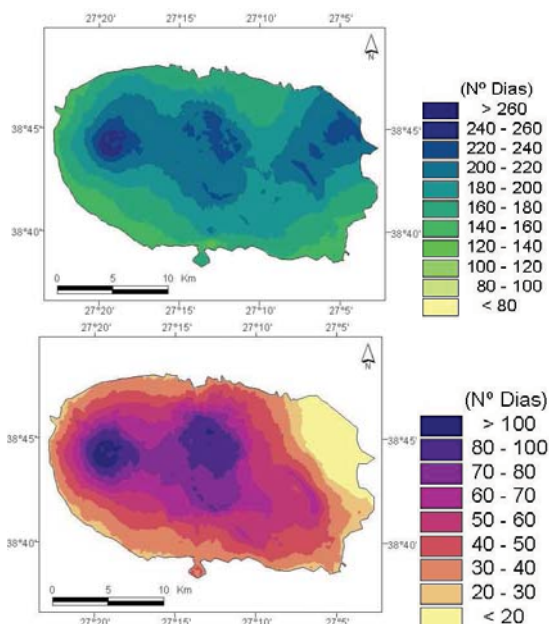


Figura 12 – Número de dias no ano com precipitação superior a (observações de 1961-1990): topo) 2,1 mm/dia; base) 10 mm/dia (SIAM, 2005; Miranda *et al.*, 2005)

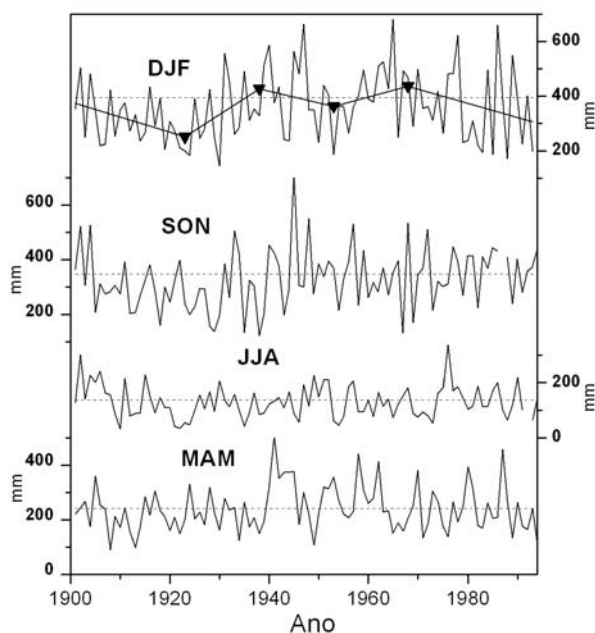


Figura 13 – Evolução da precipitação sazonal em Angra do Heroísmo (ilha Terceira – Açores) ao longo do século XX⁴⁰; as rectas a tracejado indicam a média no período 1961-1990 (SIAM, 2005; Miranda *et al.*, 2005)

⁴⁰ DJF = Dezembro, Janeiro, Fevereiro (período de Inverno); SON = Setembro, Outubro, Novembro (Outono); JJA = Junho, Julho, Agosto (Verão); MAM = Março, Abril, Maio (Primavera).

Impactos das Alterações Climáticas: Alterações nos Padrões de Temperatura e Precipitação Devido ao Aquecimento Atmosférico Global

Os eventos extremos são outros fenómenos meteorológicos (eventos de precipitação intensa, tempestades, ciclones, tornados, nevões extremamente intensos, secas intensas e prolongadas, etc.) cuja frequência e magnitude se admite venham a ser modificadas pelas alterações climáticas. O Working Group I do IPCC (2001 c) admite que a intensidade máxima de ventos e precipitações (e também as intensidades médias de precipitação) associadas aos ciclones e tempestades tropicais tem 66% a 90% de probabilidade de aumentar em algumas regiões, embora a evolução relativamente à sua frequência esteja ainda mal definida. Para Portugal Continental a incidência deste tipo de tempestades é baixa admitindo-se que os eventos de precipitação concentrada mostrem uma tendência de aumento (SIAM, 2002). Para os Açores, este aspecto está ainda pouco estudado, embora Rodrigues e Rodrigues (2001) e Rodrigues (2001 a), avaliando a evolução da actividade ciclónica a nível regional, refira a previsão de um aumento deste tipo de actividade em toda a bacia do Atlântico Norte. Outro tipo de evento extremo, as secas, mostram uma tendência para aumentar em Portugal Continental, segundo o Índice de Seca (PDSI) ao longo do século XX (SIAM, 2002). Nos Açores a situação é mal conhecida.

A evolução da temperatura atmosférica é geralmente o aspecto que mais se salienta na questão das alterações climáticas. Contudo, o maior impacto das temperaturas sobre o ciclo da água, a sua acção é no domínio dos processos de evapotranspiração. SIAM (2001) refere para Portugal Continental subidas de temperatura da ordem dos 4 °C no Inverno e até 9 °C para o Verão. Para a ilha Terceira (Açores) DROTRH e IA (2001) prevêem uma leve descida da **temperatura média**, segundo as observações registadas desde o século XIX no posto de Angra do Heroísmo, enquanto SIAM (2005) assinala, para a mesma ilha, uma subida média da **temperatura máxima** de 0,049 °C/década, no período de 1900-2002, que após 1975 subiu para 0,46 °C/década; para a **temperatura mínima** SIAM (2005) refere um incremento de 0,36 °C/década após 1975 (Fig. 14), indiciando um aquecimento mais rápido após 1957.

Do que acima se expôs conclui-se que não é aconselhável extrapolar para um dado local as tendências de evolução climática a partir dos modelos climáticos globais (GCMs), sendo necessário usar modelos climáticos regionais (RGMs) ou modelos à escala local para previsões com significado sobre as alterações dos regimes de precipitação e temperatura. Só após estas tendências estarem bem definidas é possível avançar para a previsão dos possíveis impactos das alterações climáticas sobre os recursos hídricos.

Para uma análise dos impactos das alterações climáticas sobre os recursos hídricos, fez-se uso de diferentes cenários teóricos de alteração de precipitação-evapotranspiração. Estes cenários teóricos foram obtidos a partir das projecções de evolução climática para Portugal Continental, conforme os cenários desenvolvidos por SIAM (2002), os estudos de Azevedo e Gonçalves (2003) e os de SIAM (2005) realizados para os Açores. O objectivo de se escolherem cenários de Portugal Continental e dos Açores, para aplicar a áreas específicas da ilha Terceira (ex.: Cabrito), foi o de se obter um leque de resultados para diferentes condições de evolução climática sobre um mesmo aquífero, podendo assim realizar-se uma avaliação teórica o mais

Impactos das Alterações Climáticas: Alterações nos Padrões de Temperatura e Precipitação Devido ao Aquecimento Atmosférico Global

abrangente possível das diferentes pressões que cada tipo de evolução climática será capaz de impor aos aquíferos.

Note-se além disso que em diversos modelos globais (Metereological Office) os Açores situam-se numa zona de transição entre as áreas de redução de precipitação e as de incremento de precipitação, o que aliás pode talvez explicar os resultados por vezes contraditórios entre tendências observadas no século XX para os Açores e as tendências previstas para o futuro pela maior parte dos modelos climáticos. Até mesmo o tipo de cenário de emissões utilizado pode ser determinante para impor uma tendência de descida ou de subida da precipitação. Por exemplo no estudo SIAM (2005) o modelo A2 mostra uma tendência preponderante de redução da precipitação média anual (embora isto não se verifique para toda a área da Terceira, existindo algumas zonas de acréscimo), enquanto para o modelo B2 as projecções dão uma tendência generalizada de subida desta mesma precipitação. Relativamente às temperaturas, consideraram-se os cenários de temperaturas previstos para os Açores por SIAM (2005) e para Portugal Continental pois este estudo teórico pretende compreender as respostas às situações mais extremas, mesmo se muito improváveis e eventualmente poder alargar alguns destes resultados, com as necessárias correcções, ao Continente.

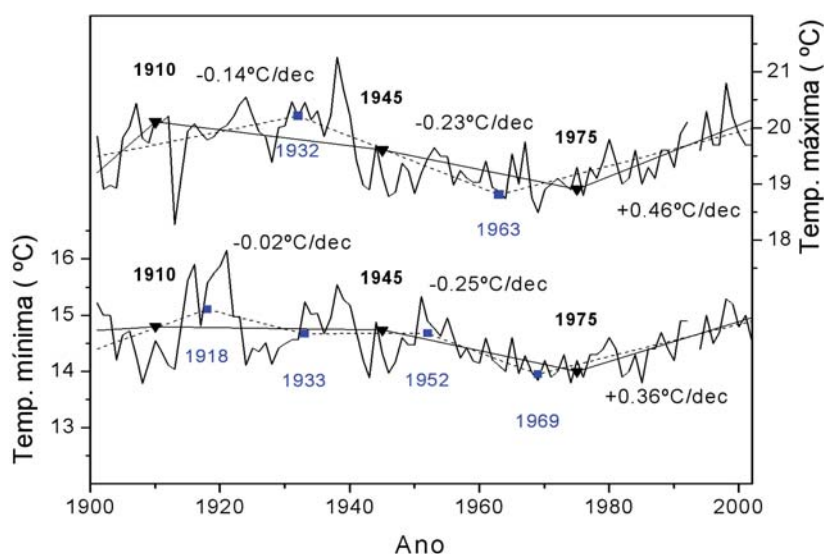


Figura 14 – Evolução da média anual das temperaturas máximas e mínimas em Angra do Heroísmo (ilha Terceira – Açores) ao longo do século XX⁴¹ (SIAM, 2005; Miranda *et al.*, 2005)

Desejava-se, por ser importante, definir nestes cenários (1) as durações médias e respectivas intensidades médias de cada tipo de evento de precipitação e sua frequência, (2) os volumes anuais totais de precipitação e a sua distribuição ao longo do ano, (3)

⁴¹ Apresentam-se os ajustes lineares às curvas calculados com os anos de mudança das tendências (1910, 1945 e 1975 - **rectas a cheio**) de Karl *et al.* (2000) e com anos móveis calculados pelo método de Tomé e Miranda (2004) (**rectas a tracejado**). Indicam-se também os valores das tendências para os períodos 1910-1945, 1946-1975 e 1976-2002.

natureza qualitativa e quantitativa das alterações nos regimes, durações e intensidades dos eventos de precipitação, (4) regime, frequência e intensidade média dos eventos de precipitação concentrada, (5) frequência, duração e intensidade média dos ciclones e tempestades tropicais, (6) volumes mensais de evapotranspiração. Porém com os dados existentes apenas foi possível estabelecer valores para os volumes totais anuais e mensais de precipitação e evapotranspiração e os volumes de precipitação por evento de chuva. Também, dada a insuficiência de informação, não foi possível analisar as modificações na duração, intensidade e frequência dos vários fenómenos extremos que podem afectar a área de estudo (ilha Terceira-Açores).

No entanto, para compreender o clima presente e os impactos das alterações climáticas, é conveniente olhar para os climas passados pois estes fornecem vários indícios para a compreensão do presente e auxiliam à previsão do futuro. Assim, é pelo passado que se iniciará este estudo.

4.1. Paleoevolução do Clima e Alterações Climáticas Passadas

Ao longo da história da Terra o clima tem registado alterações, em que a grandes períodos considerados de natureza mais ou menos quente e uniforme (ex.: Mesozóico) se sucedem períodos climatologicamente mais “instáveis”, de que são exemplo os episódios das glaciações. Estes períodos de maior oscilação climática nem sequer são típicos do Cenozóico dado que estão preservados no registo litológico em períodos tão remotos como o Pré-Câmbrico.

Por oposição ao longo período de relativa estabilidade térmica e clima mais quente do Mesozóico, a partir dos meados do Terciário começou a registar-se uma tendência de longo termo no sentido do arrefecimento, à qual se sobrepuseram as oscilações devidas aos ciclos glaciares e interglaciares, típicas das eras mais recentes da história da Terra. Só no Quaternário registaram-se 10 ciclos glaciares e interglaciares, durando cada um deles em média aproximadamente 100 000 anos. Durante os períodos glaciares – que se dividem ainda em fases frias e fases temperadas intermédias – as temperaturas médias globais são em média cerca de 4 °C mais baixas que durante os períodos não glaciares, embora em alguns locais as diferenças térmicas possam ser de 8 a 12 °C mais baixas e, no caso da Groenlândia, durante o último período glacial (cujo pico ocorreu há cerca de 21 000 anos), as temperaturas podem ter sido até 20 °C inferiores às que se registam ao longo do Holocénico (Marshall e Cuffey, 2000). Nos períodos interglaciares, dado o recuo das calotes polares e dos glaciares, entre outros processos, os níveis do mar sobem, cobrindo vastas regiões, enquanto que nos períodos glaciares os níveis do mar descem de forma dramática, e estas oscilações – que por vezes atingem mais de 100 m – estão amplamente assinaladas no registo litológico do Quaternário. Por exemplo, durante o último período interglacial (o Eemiano – ocorrido entre há 135 000 a 110 000 anos) o nível do mar subiu entre 3 a mais de 5 m acima do nível actual, admitindo Cuffey e Marshall (2000) que esta subida tenha tido uma forte contribuição da calote de gelos da Groenlândia, com uma provável contribuição secundária da fusão da calote polar antárctica. Se isto de facto se verificou, então a

actual situação de aquecimento global pode dar origem a uma subida sensível do nível do mar sem que para isso a calote polar antártica seja muito afectada. Os registos actuais apontam aliás para uma redução mais ou menos sensível da calote da Groenlândia e uma variação de tendência ainda mal definida para a calote antártica, o que pode talvez indiciar uma evolução semelhante à Eemiana.

Os Açores, dada a sua recente idade, e a sua ainda mais recente ocupação humana (e dos registos climáticos históricos), têm muito poucos indícios dos paleoclimas, excepto nas ilhas mais antigas, como por exemplo Santa Maria, cujos calcarenitos e depósitos de praias plio-pleistocénicas e quaternárias (cf. Cruz, 1992, Serralheiro *et al.*, 1987), podem possuir indícios fósseis e sedimentares capazes de vir a revelar o paleoclima açoreano. No estado actual dos conhecimentos, os estudos de paleoclimatologia dos Açores são ainda demasiado escassos para se ter uma imagem suficientemente detalhada dos antigos climas e das mudanças que estes sofreram ao longo dos últimos milhões de anos até à actualidade.

4.2. O Clima Actual na Região dos Açores e Tendências de Evolução

O clima actual dos Açores, que resulta das alterações climáticas dos paleoclimas, é uma função da interacção entre a circulação atmosférica, a orografia e a circulação oceânica. De acordo com Agostinho (1938, 1941), não se deve falar de um clima dos Açores mas dum conjunto de microclimas de transição entre os climas temperados marítimos e os climas subtropicais. A distribuição dos microclimas dos Açores é, nos seus aspectos mais gerais, controlada pela topografia⁴² e localização (costa Norte, mais pluviosa, vs. costa Sul (mais seca); sector W, mais chuvoso, ou sector E, mais seco (Ferreira, 1980). As relações da temperatura com a topografia, clássicas de Agostinho (1938) são:

$$\text{Eq. 1: } T^{\circ} = T_0 - 0,6 \times (At/100)$$

Onde:

T° = temperatura (em °C)

T_0 = temperatura à cota zero/nível do mar (em °C)

At = altitude (em m)

e a precipitação depende da altitude, conforme o mesmo autor, segundo a expressão:

$$\text{Eq. 2: } P = P_0 + 0,25 \times P_0 \times (Al/100)$$

⁴² Agostinho (1938) estabeleceu uma taxa de subida de 25% por cada 100 m até aos os 600 m de altitude; depois dessa cota a subida é mais elevada, até atingir uma altitude mal conhecida onde o crescimento é assintótico.

Onde:

P = precipitação (em mm)

P₀ = precipitação à cota zero/nível do mar (em mm)

At = altitude (em m)

Com base nas características climatológicas da região, o modelo climático local CIELO desenvolvido por Azevedo (1996) e Azevedo *et al.* (1999), usado para o downscaling dos modelos do Hadley Center (no caso o HadCM3)⁴³, e os cenários de emissões A2 e B2⁴⁴ SRES do Hadley Center, obtiveram-se os seguintes cenários para a precipitação e temperatura na ilha Terceira, para o horizonte temporal de 2100 (Santos *et al.*, 2004; Miranda *et al.*, 2005 *in* SIAM, 2005):

- **Cenário A2:**

- ◆ *Precipitação de Inverno (Dezembro, Janeiro, Fevereiro)* – subida de cerca de 15 a 27% (Fig. 15);
- ◆ *Precipitação de Verão (Junho, Julho, Agosto)* – decréscimo de 20 a 42%. A descida é mais acentuada na região sul da ilha (Fig. 15);
- ◆ *Precipitação de Primavera e Outono* – descida (não são dados valores por parte de SIAM, 2005);
- ◆ *Precipitação média anual* – variação de 0 a +4% para o maciço de Santa Bárbara, de 0 a +2% para a vertente S do maciço de Guilherme Moniz (a média altitude), e Serra da Ribeirinha, decréscimos de 0 a -6% em toda a restante área da ilha, com as zonas litorais a sofrerem os decréscimos mais elevados (Fig. 16);
- ◆ *Temperatura máxima de Verão* – aumenta de 1,7 a 2,3 °C (os maiores incrementos ocorrem no litoral SW – Maciço de Santa Bárbara; Fig. 17);
- ◆ *Temperatura mínima de Inverno* – aumentos de 1,8 a 2 °C (Fig. 18);

- **Cenário B2:**

- ◆ *Precipitação de Inverno* – subida de cerca de 10 a 22% (Fig. 15);
- ◆ *Precipitação de Verão* – decréscimo de 15 a 27%. A descida é mais acentuada na região sul da ilha, embora de modo muito inferior ao que se regista no cenário A2 (Fig. 15);
- ◆ *Precipitação de Primavera e Outono* – descida (não são dados valores por parte de SIAM, 2005);
- ◆ *Precipitação média anual* – com a excepção de pequenas regiões no centro-leste da ilha, há um aumento da precipitação de até 10%, com os sectores N e W maciço de Santa Bárbara a registarem as maiores subidas (Fig. 16).
- ◆ *Temperatura máxima de Verão* – aumenta de 1,2 (no litoral N de Guilherme Moniz) a 1,5 °C (Fig. 17);

⁴³ A partir da validação do modelo CIELO com base nas observações de 13 estações meteorológicas.

⁴⁴ O modelo A2 considera que em 2100 existirá na atmosfera uma concentração em CO₂ de 850 ppm e o modelo B2 considera uma concentração, para a mesma data, de 600 ppmv de CO₂.

Impactos das Alterações Climáticas: Alterações nos Padrões de Temperatura e Precipitação Devido ao Aquecimento Atmosférico Global

◆ *Temperatura mínima de Inverno* – aumento de 1 a 1,2 °C (Fig. 18);

Estes resultados indiciam uma tendência para o aumento da precipitação no Inverno que, em paralelo com o decréscimo de precipitação nos outros períodos do ano, podem incrementar a susceptibilidade da ilha Terceira a eventos extremos de precipitação, com uma estação chuvosa mais curta, centrada no Inverno, enquanto a temperatura será em média mais elevada cerca de 1 a 2 °C. A alteração na distribuição de precipitação ao longo do ano, associada a uma maior temperatura atmosférica, pode alterar o ciclo de desenvolvimento vegetativo (e por consequência o coberto vegetal e os processos de retenção radicular da água, escoamento superficial e evapotranspiração), em particular devido à perda de precipitação na Primavera.

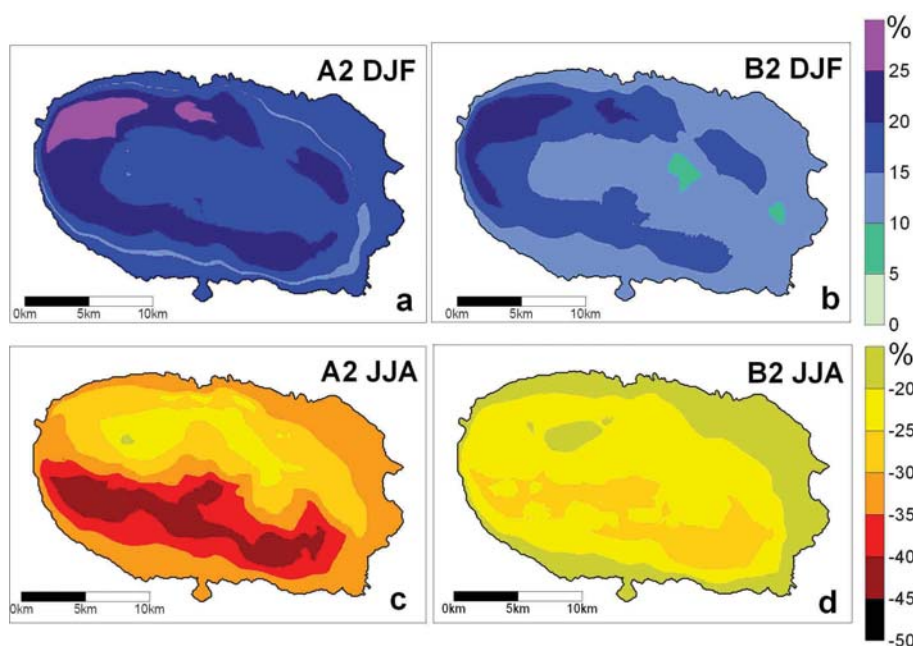


Figura 15 – Evolução da precipitação sazonal na Terceira (SRES – Controlo) para o ano 2100: (a) Inverno (cenário A2); (b) Inverno (cenário B2); (c) Verão (cenário A2); (d) Verão (cenário B2) (SIAM, 2005; Miranda *et al.*, 2005)

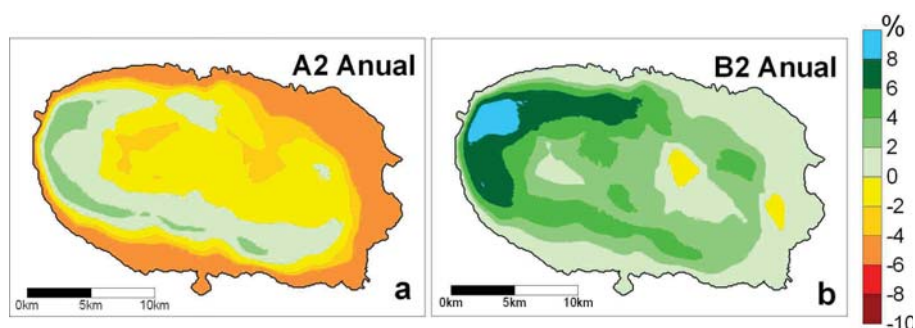


Figura 16 – Evolução da precipitação anual na Terceira para o ano 2100: (a) cenário A2; (b) cenário B2 (SIAM, 2005; Miranda *et al.*, 2005)

Impactos das Alterações Climáticas: Alterações nos Padrões de Temperatura e Precipitação Devido ao Aquecimento Atmosférico Global

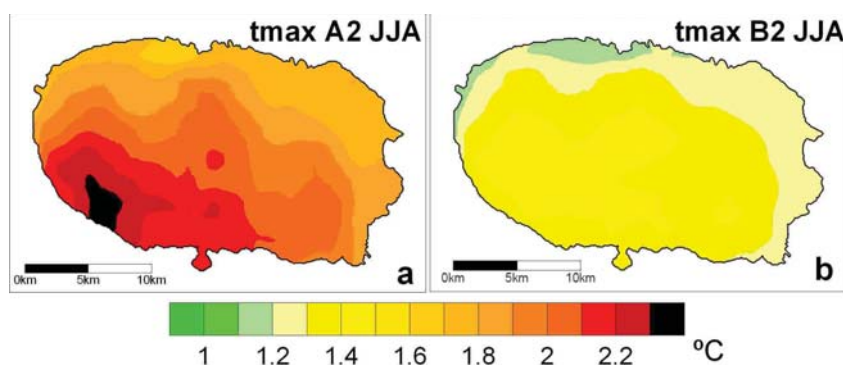


Figura 17 – Evolução da temperatura máxima no Verão (Terceira) para o ano 2100: (a) cenário A2; (b) cenário B2 (SIAM, 2005; Miranda *et al.*, 2005)

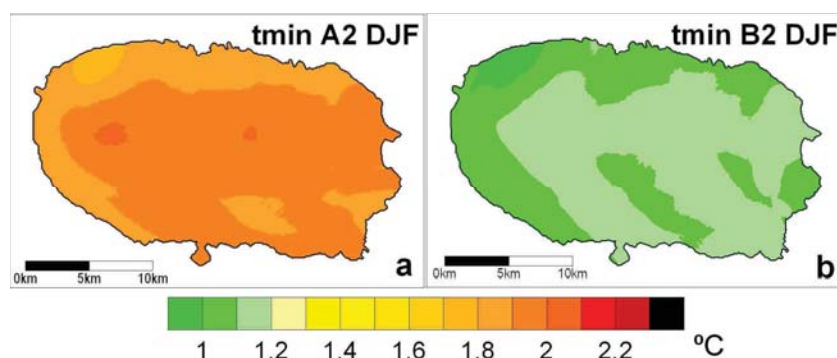


Figura 18 – Evolução da temperatura mínima no Inverno (Terceira) para o ano 2100: (a) cenário A2; (b) cenário B2 (SIAM, 2005; Miranda *et al.*, 2005)

A partir dos resultados destes cenários, e com base em séries de evapotranspiração e precipitação actuais (no caso para a região do Cabrito), constroem-se séries teóricas de precipitação e temperatura/evapotranspiração, as quais serão introduzidas (como dados de partida) nos modelos de balanço hídrico, calculando-se assim os valores de recarga e escoamento superficial para estas novas condições.

Dado que não se pretende apenas conhecer como o meio hídrico subterrâneo duma dada região dos Açores reage nas condições propostas pelos cenários de alteração climática estabelecidos pelos especialistas, mas ter uma ideia mais global de como meios com idênticas características reagem a diferentes tendências de alteração do clima foram também considerados os cenários estabelecidos por SIAM (2002) para o Continente Português. Na realidade esta abordagem pretende simular como meios de comportamento hidráulico similar mas situados em latitudes diferentes (logo com evoluções locais do clima distintas para o mesmo quadro de alterações globais; cf. capítulo 2 onde se discute as tendências de evolução opostas da precipitação nas altas e baixas latitudes) reagem a distintas condições de alterações climáticas. Assim, com base nas informações de SIAM (2002) e SIAM (2005) os cenários para Portugal Continental são:

Impactos das Alterações Climáticas: Alterações nos Padrões de Temperatura e Precipitação Devido ao Aquecimento Atmosférico Global

• Precipitação:

- ◆ *Cenário A* – descida de 0,3 mm/dia;
- ◆ *Cenário B* – descida de 0,5 mm/dia;
- ◆ *Cenário C* – descida de 1 mm/dia;
- ◆ *Cenário D* – descida de 15% na precipitação média anual (as precipitações diárias são reduzidas, cada uma, em 15% do valor original, obtendo-se assim a série alterada);

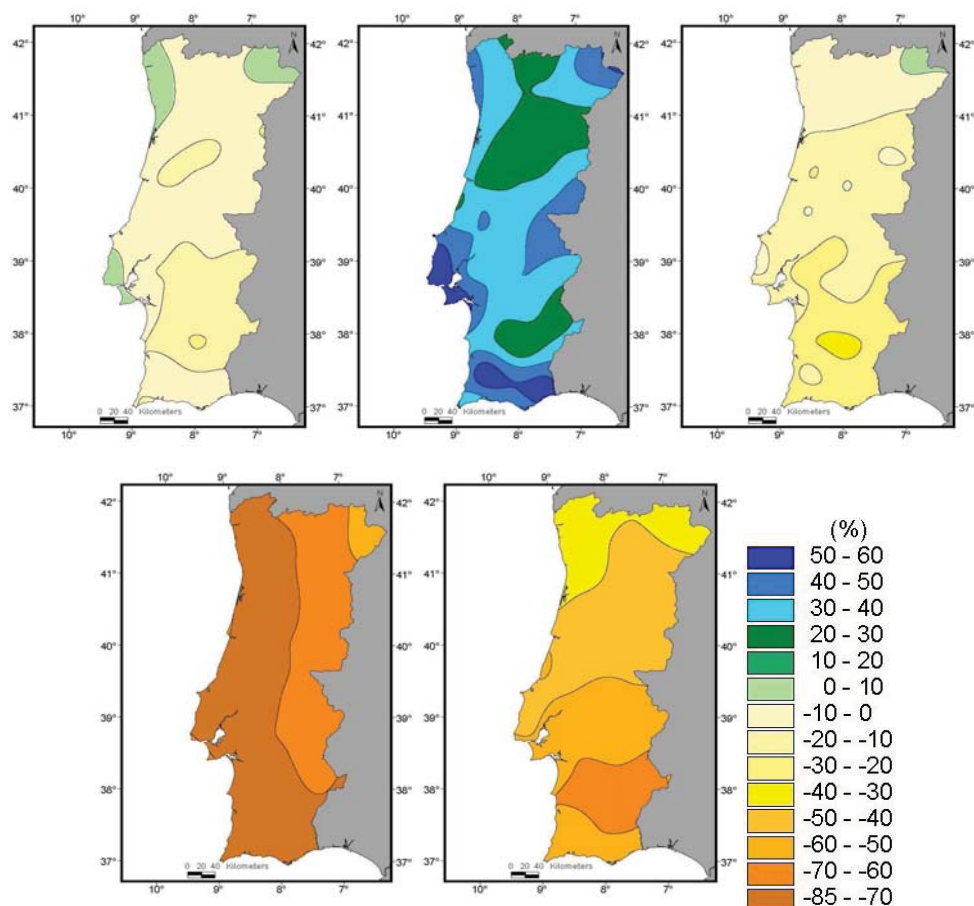


Figura 19 – Cenários de alteração da precipitação para Portugal Continental [modelo HadRM2 (cenário de emissão IS92a) em percentagem da simulação de controlo: (a) Anual; (b) Inverno; (c) Primavera; (d) Verão; (e) Outono] in Miranda *et al.* (2005)

- ◆ *Cenário E* – descida 20% na precipitação média anual (as precipitações diárias são reduzidas, cada uma, em 20% do valor original, obtendo-se assim a série alterada);
- ◆ *Cenário 20* – Primavera: desce 30%, Verão: desce 15%, Outono: desce 60%, Inverno: sobe 20%; equivale a descer 25,3% na precipitação média anual;

Impactos das Alterações Climáticas: Alterações nos Padrões de Temperatura e Precipitação Devido ao Aquecimento Atmosférico Global

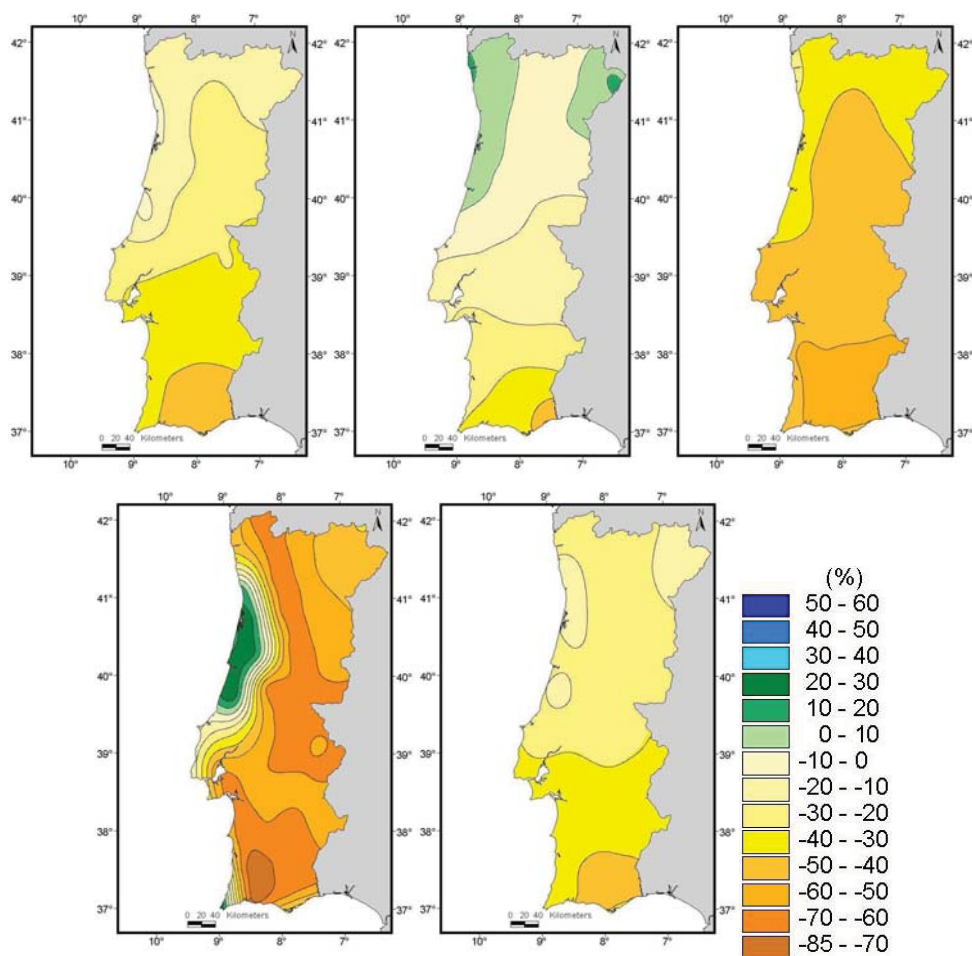


Figura 20 – Cenários de alteração da precipitação para Portugal Continental [modelo HadRM3 (cenário de emissão A2): (a) Anual; (b) Inverno; (c) Primavera; (d) Verão; (e) Outono] in Miranda *et al.* (2005)

- ◆ *Cenário 30* – Primavera: desce 30%, Verão: desce 15%; Outono: desce 35%, Inverno: sobe 20%; equivale a descida de 14,9% na precipitação média anual (valores compreendidos no intervalo de redução da precipitação média anual de 10-20% calculado por Miranda *et al.*, (2005 in SIAM, 2005) cf. da Fig. 19);
- ◆ *Cenário 50* – Primavera: desce 30%, verão: desce 15%, Outono: desce 35%, Inverno: sobe 50%; equivale a descida de 5,8% na precipitação média anual;
- ◆ *Cenário 60* – Primavera: desce 30%, verão: desce 15%, Outono: desce 60%, Inverno: sobe 50%; equivale a descer 15,9% na precipitação média anual;
- ◆ *Cenário HadRM3 (emissões A2)* – Primavera: desce entre 30 a 60%, Outono: desce 20 a 40%, Verão: subida até 30% no litoral centro e descida até 70% no resto do país, Inverno, descida até 40% em todo o país excepto litoral centro-norte e extremo leste de Trás os Montes que regista subidas de até 20%; as médias anuais registam perdas de 10 a 50% (Fig. 20);

Impactos das Alterações Climáticas: Alterações nos Padrões de Temperatura e Precipitação Devido ao Aquecimento Atmosférico Global

- ◆ *Cenário HadRM3 (emissões B2)* – Primavera: desce 10 a 35%, Outono: desce menos de 30%, Verão: subida até 30% no litoral centro e descida até 65% no resto do país, Inverno: leve subida até 10% no litoral do Minho, descida de até 30% no resto do país (Fig. 21).

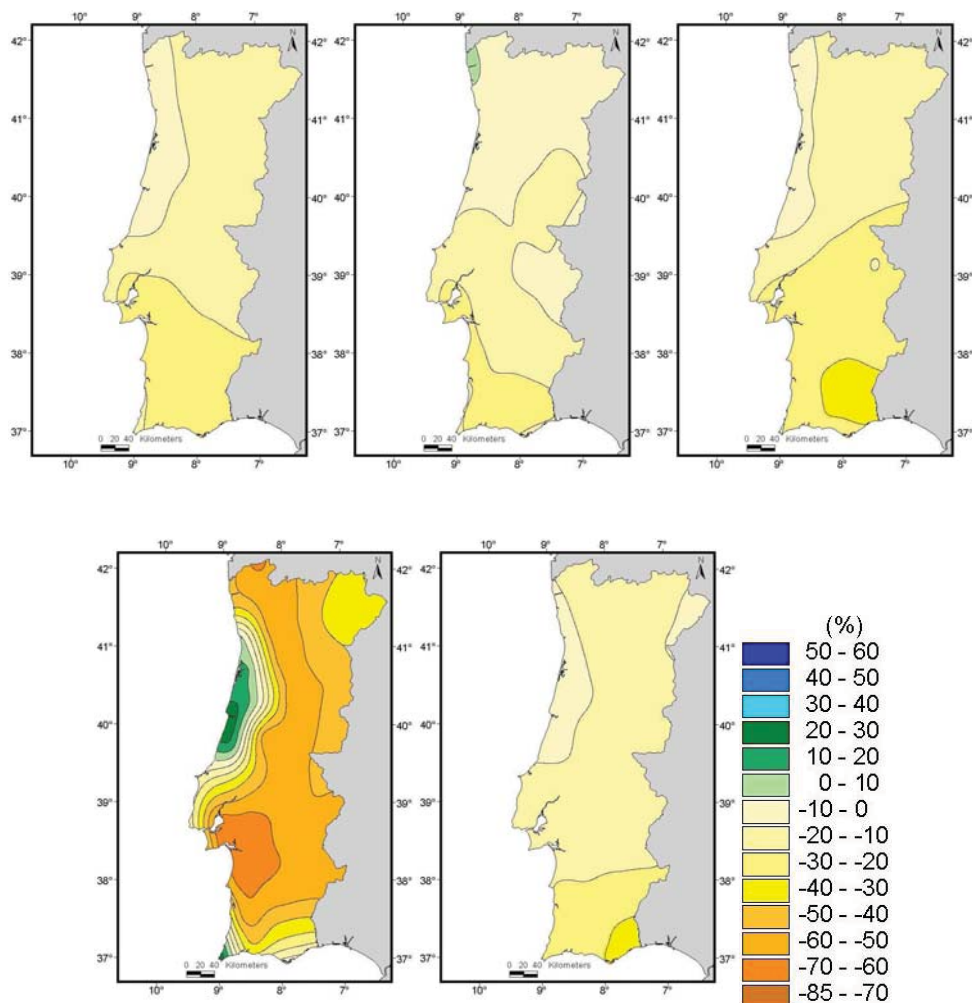


Figura 21 – Cenários de alteração da precipitação para Portugal Continental [modelo HadRM3 (cenário de emissão B2): (a) Anual; (b) Inverno; (c) Primavera; (d) Verão; (e) Outono] in Miranda *et al.* (2005)

- **Temperatura:**

- ◆ *Cenário HadRM2 (emissões IS92a)* – mínima de Inverno: sobe entre 4 a 6 °C; máxima de Verão: sobe 4,5 a 10 °C (Figs. 22 e 23);
- ◆ *Cenário HadRM3 (emissões A2)* – mínima de Inverno: sobe 2,5 a 3,5 °C; máxima de Verão: sobe de 1,5 a 7,5 °C (Figs. 22 e 23);
- ◆ *Cenário HadRM3 (emissões B2)* – mínima de Inverno: sobe de 1 a 2 °C; máxima de Verão: sobe de 1,5 a 6,5 °C (Figs. 22 e 23)

Impactos das Alterações Climáticas: Alterações nos Padrões de Temperatura e Precipitação Devido ao Aquecimento Atmosférico Global

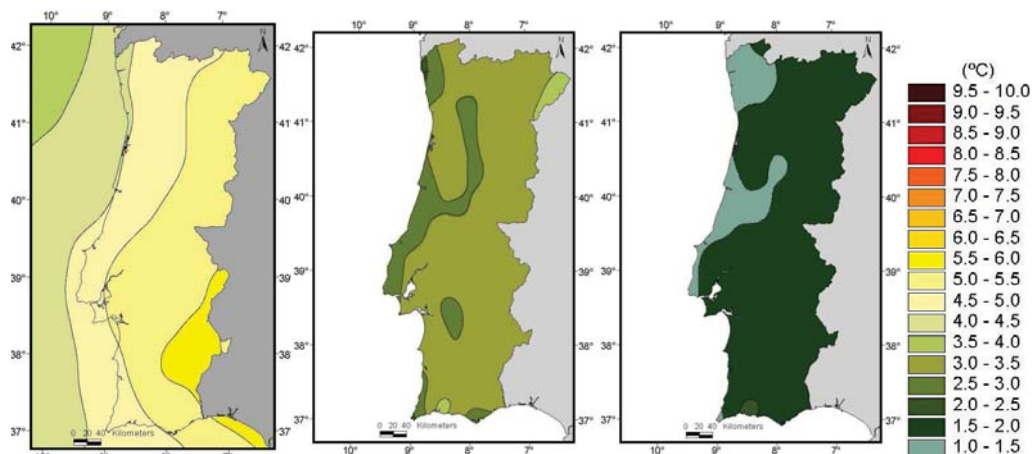


Figura 22 – Cenários de alteração da temperatura mínima no Inverno: (a) HadRM2, cenário IS92a, (b) HadRM3, cenário A2; (c) HadRM3, cenário B2, in Miranda *et al.* (2005)

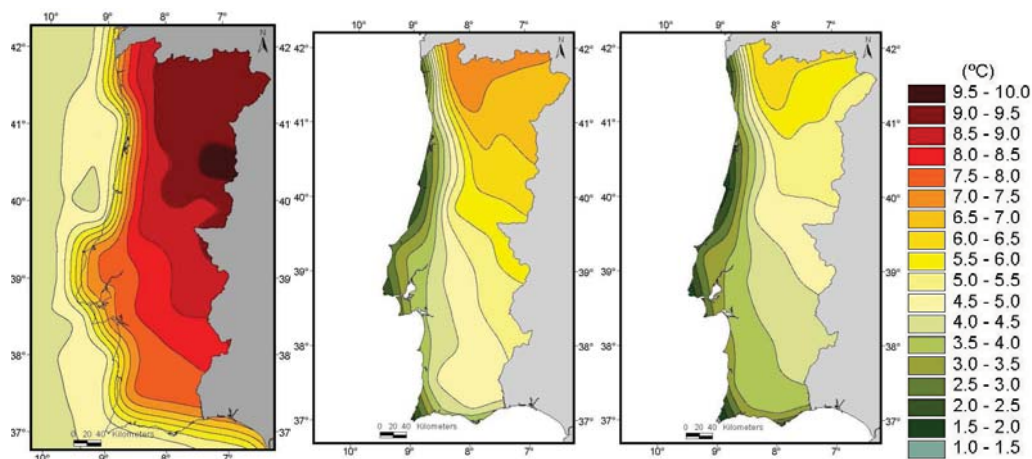


Figura 23 – Cenários de alteração da temperatura máxima no Verão: (a) HadRM2, cenário IS92a, (b) HadRM3, cenário A2; (c) HadRM3, cenário B2, in Miranda *et al.* (2005)

4.3. Aplicação dos Cenários de Evolução das Precipitações, Evapotranspirações, Ciclones, Tempestades Tropicais e Outros Eventos Extremos aos Modelos de Balanço Hídrico

Neste capítulo faz-se a análise das variações da evapotranspiração e da precipitação para diferentes cenários de alterações climáticas conforme estabelecidos por IPCC (2002), SIAM (2002), SIAM (2005), aplicados a séries de precipitação dos Açores, obtendo-se para cada cenário valores de variação mensais e anuais. Procurou-se igualmente, na medida do possível, fazer uma avaliação das alterações nas frequências, intensidades e durações dos eventos de precipitação e dos eventos extremos (ciclones, tempestades tropicais, etc.) mas, devido à grande escassez de dados de base, não se conseguiu realizar tal avaliação e menos ainda elaborar cenários evolutivos sobre estas

variáveis, o que é bastante importante para um consolidado estudo dos impactos das alterações climáticas nos recursos hídricos subterrâneos.

4.3.1. CENÁRIOS DE PRECIPITAÇÃO E EVAPOTRANSPIRAÇÃO: ALTERAÇÃO NA DISTRIBUIÇÃO ANUAL E VOLUMES ANUAIS TOTAIS DE PRECIPITAÇÃO E EVAPOTRANSPIRAÇÃO

Como se pretende fazer uma análise teórica dos impactos das alterações climáticas sobre aquíferos característicos da ilha Terceira, consideraram-se não apenas os valores de variação de precipitação obtidos a partir dos cenários estabelecidos para os Açores por DROTRH e IA (2001) e SIAM (2005) mas também os cenários estabelecidos por SIAM (2002) para Portugal Continental, dado que os Açores se situam numa área de transição entre a faixa de aumentos de precipitação (altas latitudes) e a de redução de precipitação (baixas latitudes) definidas pelos cenários de alterações climáticas do IPCC (1995). Os valores de precipitação obtidos⁴⁵, foram utilizados para simular recargas teóricas em diferentes condições de permeabilidade e coberto vegetal dos terrenos, que embora não cubram todas as situações desta ilha, representam as mais importantes entre as actuais regiões potenciais de recarga. Paralelamente procurou-se estabelecer cenários teóricos de evapotranspiração, a partir de cenários de evolução da temperatura para o século XXI, definidos por SIAM (2002), SIAM (2005), DROTRH e IA (2001), aplicando as fórmulas de Turc às temperaturas previstas, dado à data de realização deste trabalho os dados conhecidos não permitirem a elaboração de cenários de evapotranspiração mais refinados. Estes dois parâmetros são necessários para o cálculo posterior da recarga.

Começando pelo estabelecimento de cenários para a evapotranspiração, optou-se por considerar um conjunto de cenários teóricos que pudessem retratar diferentes casos de evolução da evapotranspiração. Pretendendo-se uma análise teórica dos impactos das alterações climáticas sobre o meio aquífero, e considerando que as variações térmicas para os Açores indiciam, segundo SIAM (2005), uma leve subida da temperatura de 1 a 1,2 °C no Inverno e 1,2 a 1,5 °C no Verão, optou-se por considerar um limite superior de +2 °C e, além deste valor, usarem-se as tendências de evolução da temperatura de SIAM (2002), que embora desenvolvidas para o Continente, abrangem um leque mais vasto e extremo de variação de temperaturas. Em SIAM (2002) admitem-se aumentos médios de temperatura entre 4,5 a 5 °C para a bordadura litoral central até 6,5 °C para o interior, registando os modelos regionais de clima extremos de variação entre +2 °C e +12 °C. Considerando uma precipitação média constante (no caso escolheu-se 1000 mm/ano, valor mínimo da média de precipitação anual para a ilha Terceira) e uma temperatura de 15 °C (valores médios anuais aproximados para a mesma ilha) e aplicando a fórmula de Turc, determinou-se a variação da evapotranspiração média real para cada incremento de temperatura, como se pode ver do Quadro VI:

⁴⁵ A partir da aplicação das tendências de alteração a séries de precipitação conhecidas na ilha Terceira.

Quadro VI – Variação da Evapotranspiração Real com o Aumento da Temperatura Média Anual, Considerando a Precipitação Média Anual Constante

Precipitação (mm)	Temperatura (°C)	Incremento Temperatura (°C)	Evapotranspiração Real (mm)	Varição Evapotranspiração (em %)
1000	15,00	0	330,75	0,00 – situação de referência
1000	17,00	+ 2	366,45	+ 10,79
1000	17,50	+ 2,5	375,30	+ 13,47
1000	18,50	+ 3,5	392,88	+ 18,78
1000	19,50	+ 4,5	410,28	+ 24,04
1000	20,00	+ 5	418,90	+ 26,65
1000	20,50	+ 5,5	427,46	+ 29,24
1000	21,00	+ 6	435,97	+ 31,81
1000	21,50	+ 6,5	444,41	+ 34,36
1000	22,00	+ 7	452,79	+ 36,90
1000	27,00	+ 12	532,63	+ 61,04

Daqui conclui-se que, variando apenas a temperatura, a alteração da evapotranspiração pode oscilar entre cerca de +11 e +61%, para valores de base de 15 °C e 1000 mm. Em função dos resultados acima calculados definiram-se (cf. Quadro VII) os cenários de alteração da evapotranspiração a aplicar no estudo.

Deve referir-se porém que o trabalho de DROTRH e IA (2001) considera para a região dos Açores, uma evolução das temperaturas inversa à que é apontado por SIAM (2005), indicando que, com base em dados apresentados por Azevedo e Gonçalves (1993) para um intervalo de tempo de observações significativo (mais de 100 anos), existiria uma mui leve tendência não de subida mas de descida de temperatura média anual (Fig. 24).

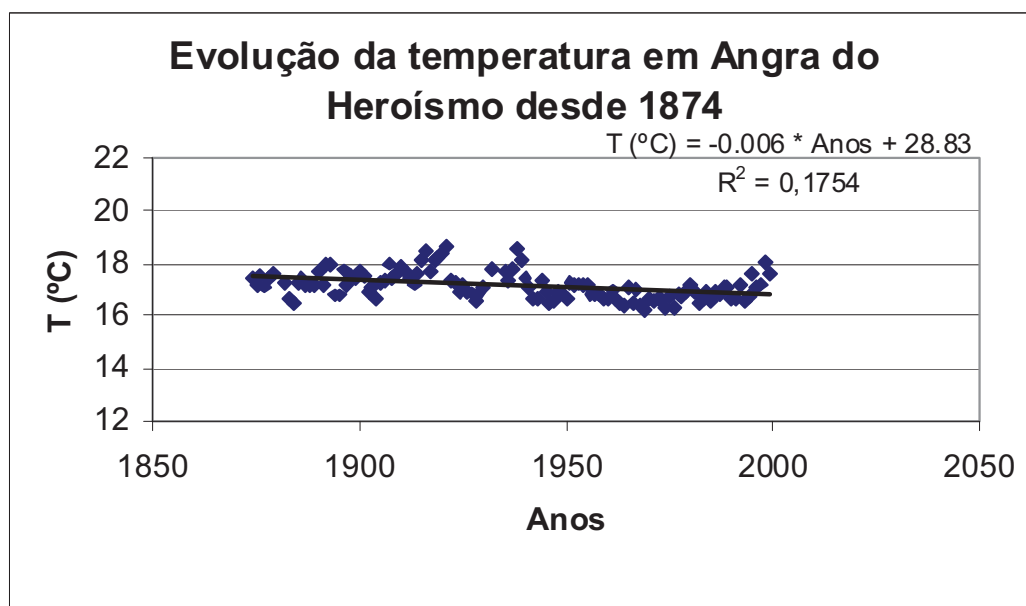


Figura 24 – Evolução da Temperatura em Angra desde 1874 (dados de Azevedo e Gonçalves, 1993 in DROTRH e IA, 2001)

Impactos das Alterações Climáticas: Alterações nos Padrões de Temperatura e Precipitação Devido ao Aquecimento Atmosférico Global

Contudo os dados deste trabalho, se tomados na sua globalidade, mostram uma considerável dispersão e indiciam a existência de períodos com tendências de evolução térmica opostas, dentro da sequência principal. Verifique-se que por exemplo o último troço dos dados mostra uma tendência de subida bastante marcada (Fig. 24).

Voltando ainda ao cálculo da evapotranspiração, e usando ainda a fórmula de Turc para o cálculo da evapotranspiração real, a partir dos dados de temperatura e precipitação registados no posto de Angra do Heroísmo desde 1874, verifica-se (Fig. 25) que se teria um decréscimo da evapotranspiração da ordem dos – 4,1% em Angra do Heroísmo.

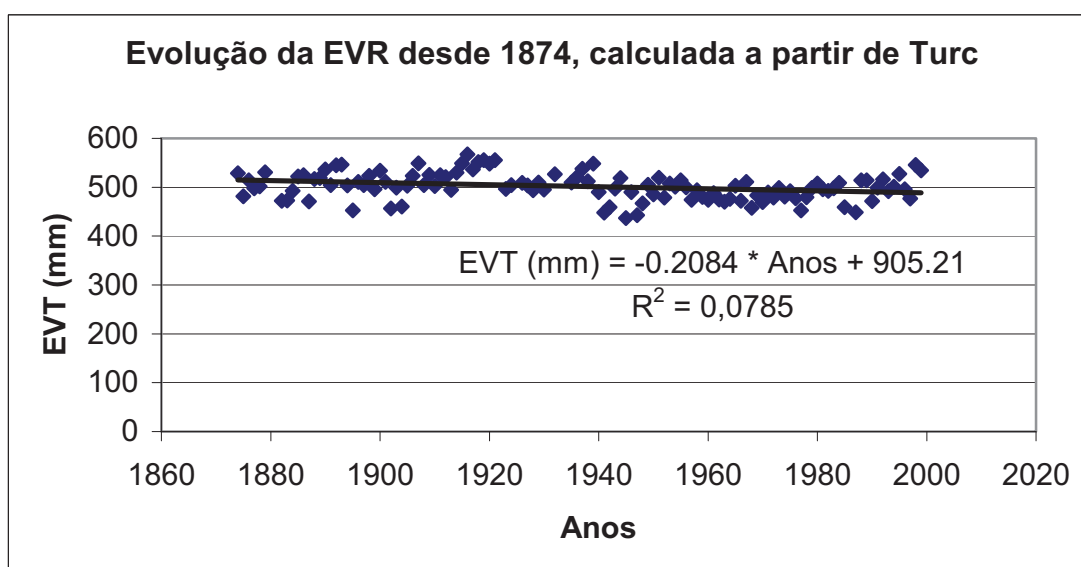


Figura 25 – Evolução da Evapotranspiração Real (Turc) em Angra desde 1874 (dados de Azevedo e Gonçalves, 1993 in DROTRH e IA, 2001)

Assim, com base nos estudos de DROTRH e IA (2001), e se se admitir que a evolução futura segue a tendência dominante dos registos dos últimos 100 anos, o cenário de evolução da evapotranspiração que emergiria seria o assinalado no sector azul do Quadro VII. Contudo a evolução real pode ser um pouco diversa desta tendência dos últimos 100 anos, indiciado aliás pelas simulações dos modelos climáticos para vários cenários de emissões de gases de efeito de estufa (cf. IPCC, 2002), dependendo tudo das taxas de subida dos níveis de CO₂ na atmosfera. Veja-se por exemplo a questão das precipitações em que para a região dos Açores, para o cenário A2 do IPCC, os modelos sugerem uma redução da precipitação para o século XXI, ao passo que no cenário B2 existe pelo contrário uma subida da precipitação. A subida dos teores de CO₂ pode criar um ponto ou momento de inflexão em que a tendência futura claramente se desvia da tendência registada ao longo de um intervalo de tempo anterior mais ou menos longo e pode ser que a súbita inflexão dos valores no final do gráfico possa corresponder não a uma oscilação no fenómeno mas já a essa inflexão. Contudo os dados presentes não permitem determinar, de facto, qual será a situação real. Assim, embora se deva considerar a tendência do último século, deve ter-se em mente que esta pode ser diversa das tendências futuras e tomar em consideração também o que nos

Impactos das Alterações Climáticas: Alterações nos Padrões de Temperatura e Precipitação Devido ao Aquecimento Atmosférico Global

indicam os modelos. Em especial os que fazem o *downscaling* dos modelos globais que integram a informação e funcionamento da atmosfera ao nível da climatologia local.

Para o estabelecimento de cenários, embora se haja considerado que não devesse pôr-se de parte a evolução sugerida pelas rectas de tendência, admite-se que os resultados de SIAM (2005) são bastante fiáveis, dado não só se basearem no “*downscaling*” de cenários do Hadley Center (HadRM3) a partir do modelo CIELO, desenvolvido e calibrado para a ilha Terceira, por Azevedo (1996), como consideram a evolução climática em função de dois cenários de emissão de gases de estufa definidos pelo IPCC (2001): o cenário A2 (concentração de 850 ppmv de CO₂ em 2100) e o cenário B2 (concentração de 600 ppmv de CO₂ em 2100), tal como explica em Santos *et al.* (2004). Assim, e segundo o Quadro VI, o cenário de evolução da evapotranspiração que representa as condições definidas por SIAM (2005) é assinalado no sector verde do Quadro VII, que apresenta também o conjunto total de cenários escolhidos para este estudo teórico dos impactos da alteração das temperaturas na evapotranspiração e recursos hídricos subterrâneos.

Quadro VII – Cenários de Evapotranspiração Teóricos Estabelecidos para Analisar a Resposta da Componente Recarga à Alteração da Evapotranspiração

Cenários de Evapotranspiração		Valores de Evapotranspiração (mm) para os Anos					
		1990	1991	1992	1993	1994	1995
Sobe 1,5%	Total anual	666,6	654,2	654,4	620,0	633,2	690,8
	Média anual	55,5	54,5	54,5	51,7	52,8	57,6
Sobe 5%	Total anual	689,5	676,7	676,9	641,3	655,0	714,6
	Média anual	57,5	56,4	56,4	53,4	54,6	59,6
Sobe 10%	Total anual	722,4	709,0	709,2	671,9	686,2	748,7
	Média anual	60,2	59,1	59,1	56,0	57,2	62,4
Sobe 15%	Total anual	755,2	741,2	741,4	702,4	717,4	782,7
	Média anual	62,9	61,8	61,8	58,5	59,8	65,2
Sobe 20%	Total anual	788,0	773,4	773,6	733,0	748,6	816,7
	Média anual	65,7	64,5	64,5	61,1	62,4	68,1
Sobe 25%	Total anual	820,9	805,6	805,9	763,5	779,8	850,8
	Média anual	68,4	67,1	67,2	63,6	65,0	70,9
Sobe 30%	Total anual	853,7	837,9	838,1	794,0	810,9	884,8
	Média anual	71,1	69,8	69,8	66,2	67,6	73,7
Sobe 40%	Total anual	919,4	902,3	902,6	855,1	873,3	952,8
	Média anual	76,6	75,2	75,2	71,3	72,8	79,4
Sobe 50%	Total anual	985,1	966,8	967,1	916,2	935,7	1020,9
	Média anual	82,1	80,6	80,6	76,4	78,0	85,1
Desce 5%	Total anual	623,9	612,3	612,5	580,3	592,6	646,6
	Média anual	52,0	51,0	51,0	48,4	49,4	53,9
Desce 10%	Total anual	591,0	580,1	580,2	549,7	561,4	612,5
	Média anual	49,3	48,3	48,4	45,8	46,8	51,0
Desce 15%	Total anual	558,2	547,8	548,0	519,2	530,2	578,5
	Média anual	46,5	45,7	45,7	43,3	44,2	48,2
Desce 20%	Total anual	525,4	515,6	515,8	488,6	499,0	544,5
	Média anual	43,8	43,0	43,0	40,7	41,6	45,4
Desce 25%	Total anual	492,5	483,4	483,5	458,1	467,9	510,5
	Média anual	41,0	40,3	40,3	38,2	39,0	42,5
Desce 30%	Total anual	459,7	451,2	451,3	427,6	436,7	476,4
	Média anual	38,3	37,6	37,6	35,6	36,4	39,7

Impactos das Alterações Climáticas: Alterações nos Padrões de Temperatura e Precipitação Devido ao Aquecimento Atmosférico Global

Deve ser referido contudo que os modelos em questão não contabilizam os efeitos radiativos dos sulfatos, aerossóis minerais e sal marinho (Felix, 2005, comunicação oral) e poderão por esta razão ter algum enviesamento das previsões.

Quanto à precipitação, começou por se considerar um conjunto de cenários derivados dos resultados dos modelos climáticos globais. Segundo alguns cenários do IPCC (2002) para a região dos Açores registava-se, desde 1900 a 2000, uma tendência de incremento de 10 a 20% na precipitação. Porém apesar desta tendência, o mesmo IPCC (2002) apresenta cenários de variação da precipitação – SRES cenário A2 – para o período de 2070 a 2100 com uma redução da ordem dos 0 a 0,25 mm/dia, o que não se afasta muito de projecções do Hadley Center, que apontavam para os Açores variações da ordem dos +0,2 mm/dia a –0,2 mm/dia, mas aproximando-se da faixa de variação de precipitação dos -0,2 mm a –0,5 mm/dia, como mostra a Web page do Hadley Center: http://meteoffice.gov.uk/research/hadleycentre/models/modeldata/HadCM2_IS92a_map_P_ann_19601990_20702100.gif.

Não só porque os modelos climáticos globais raramente dão uma resposta fiável face às condições locais (vide os cenários de incremento de precipitação para Portugal dados pelo IPCC em <http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/java/gcm.html> para 2080 quando o projecto SIAM (2001) aponta para uma descida global da precipitação para a totalidade do território até cerca de 15%, embora regiões isoladas do Minho e de Trás os Montes possam registar um aumento global de precipitação) mas porque este é um trabalho teórico que procura compreender o comportamento dos aquíferos quando expostos a diferentes condições decorrentes dos diversos cenários de alterações climáticas, usou-se a informação existente: (1) nos trabalhos de Azevedo e Gonçalves (2003) sobre a evolução das precipitações em Angra do Heroísmo desde 1874, e também já acima usado para determinar as tendências de evolução da evapotranspiração, (2) em SIAM (2005), assim como (3) os resultados da modelação aplicada a Portugal Continental em SIAM (2002). Se se considerar a análise do trabalho de Azevedo e Gonçalves (1996), feita em DROTRH e IA (2001), na estação de Angra do Heroísmo (para um período de 1874 a 1999, donde com alguma representatividade do ponto de vista das tendências recentes de alterações climáticas) há tendência de subida nos valores médios anuais de precipitação da ordem de 6% ao ano (Fig. 26), com uma variação sazonal em que ocorre uma tendência de aumento da precipitação da ordem dos 15% na estação húmida, enquanto que no Verão não parece existir tendência sensível para qualquer tipo de alteração; isto é uma evolução climática local distinta da registada para o Continente (Projecto SIAM, 2001). Esta mesma tendência é assinalada por IPCC (2002) onde são apontados valores de aumento da precipitação entre 5 a 10% para as latitudes médias e elevadas do hemisfério Norte, com um intervalo de confiança de 90 a 95% e valores de subida da precipitação entre 6 a 20% para a zona dos Açores, ao longo do século XX. Contudo e tomando o exemplo do mesmo IPCC (2002) que mostra como as tendências de precipitação entre 1900 e 2000 podem ser algo distintas das projecções dos cenários de alterações climáticas para 2100, alerta-se para o facto de que este valor de subida de 6% na precipitação deve ser tomado com algumas reservas. Com efeito os Working Group I do IPCC (2001 c) e Working Group II do IPCC (2001) dão projecções de descida da precipitação até ao ano de 2080 entre – 0,5 a – 1 mm/dia.

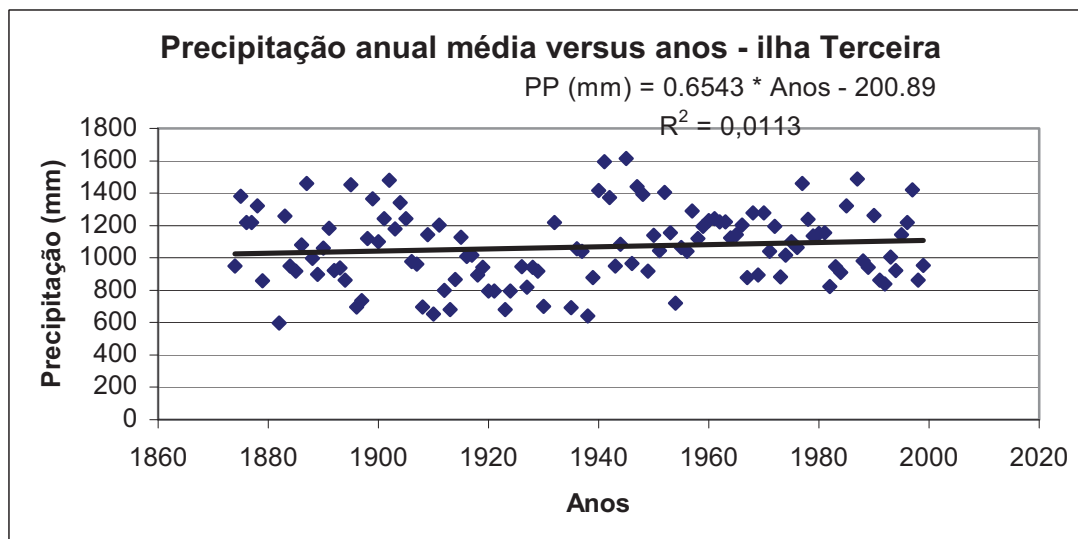


Figura 26 - Evolução da Precipitação em Angra desde 1874 (dados de Azevedo e Gonçalves, 1993 in DROTRH e IA, 2001)

Se se considerar o estudo de SIAM (2005) para os Açores, a situação é um pouco mais complexa, verificando-se que, para as precipitações médias anuais, existirá uma tendência global de descida para a ilha Terceira (embora com áreas como o flanco S e W de Santa Bárbara e Guilherme Moniz-Ribeirinha onde se prevejam subidas de precipitação de até +4%) que variará entre 0 e -6%, no caso dum cenário de emissões de gases de efeito de estufa mais catastrófico (cenário A2); para um cenário de emissões mais controlado (cenário B2) a tendência é de uma subida da precipitação média anual entre 0 a 10%, situando-se os valores médios na ordem dos 4%.

Deve contudo referir-se que os Modelos Climáticos Globais (GCM's) utilizados em alguns dos projectos acima citados não consideram o efeito dos aerossóis na formação da chuva, em especial o aerossol de pequenas dimensões, que funciona como núcleo de condensação de nuvens; um incremento na sua concentração pode levar a um aumento da probabilidade de formação de nuvens e ocorrência de chuva. Não sendo considerado este aspecto é compreensível que possa surgir alguma contradição relativa entre os vários cenários propostos pelas diferentes fontes acima citadas.

Em face destes cenários por vezes contraditórios e pelo facto dos Açores se situarem numa região de transição entre as faixas de redução e de incremento de precipitação (de acordo com os modelos climáticos globais usados pelo IPCC e Hadley Center) optou-se por considerar cenários de redução e cenários de incremento de precipitação por forma a obter uma compreensão mais abrangente do impacto da variação da precipitação sobre a recarga, se se mantiverem todos os outros factores constantes. Assim, para os cenários de redução de precipitação, optou-se por usar as projecções apontadas por SIAM (2001 e 2002) para o Continente, pois estas projecções mais do que englobam o leque de variações negativas atribuídas para os Açores na 2^a fase do estudo SIAM (SIAM, 2005). Segundo este estudo, a variação global da precipitação para o Continente tem uma redução da ordem dos 10% a 15%, para a maior parte do território, e de 20 a 30% para as regiões do Alentejo. O mesmo estudo aponta

Impactos das Alterações Climáticas: Alterações nos Padrões de Temperatura e Precipitação Devido ao Aquecimento Atmosférico Global

variações sazonais de 30% de redução na Primavera, 15% no Verão (que pode contudo chegar aos 65 a 75% em determinadas regiões), uma redução entre 35 e 60% no Outono e uma subida entre os 20 e os 50% no Inverno, definindo-se deste modo os cenários (Quadros VIII e IX) que posteriormente se aplicaram à análise das recargas:

Quadro VIII – Valores Estabelecidos pelos Cenários Teóricos de Redução de Precipitação para Analisar a Resposta da Componente Recarga à Alteração da Precipitação (série de precipitação do Cabrito)

Anos	-0.3 mm/dia	-0.5 mm/dia	-1 mm/dia	-15 % anual	-20 % anual	Cenário 30 (1)	Cenário 20 (2)	Cenário 50 (3)	Cenário 60 (4)
1990	2741,3	2706,0	2623,2	2377,8	2237,9	2311,7	2006,8	2517,7	2212,8
1991	1873,4	1845,3	1783,1	1776,5	1535,7	1631,9	1626,6	2021,8	1871,9
1992	1807,1	1776,2	1704,5	1577,8	1485,6	1490,8	1243,0	1622,8	1375,0
1993	2062,5	2028,5	1952,2	1800,8	1695,9	1909,4	1705,8	2176,7	1993,5
1994	1988,8	1958,9	1852,6	1732,5	1630,5	1656,3	1392,7	1796,1	1532,5
1995	2486,7	2452,3	2372,5	2161,3	2034,7	2150,7	1933,5	2364,9	2169,6

(1) precipitação a -30% Primavera, -15% no Verão, -35% no Outono, +20% no Inverno = -14,9% precipitação anual;
 (2) precipitação a -30% Primavera, -15% no Verão, -60% no Outono, +20% no Inverno = -25,3% precipitação anual;
 (3) precipitação a -30% Primavera, -15% no Verão, -35% no Outono, +50% no Inverno = - 5,8% precipitação anual;
 (4) precipitação a -30% Primavera, -15% no Verão, -60% no Outono, +50% no Inverno = - 15,9% precipitação anual;

Nota: -15% anual e -20% anual significa que se afectou a série de uma redução de cerca de 15 e 20% por dia, respectivamente, o que originou 15 e 20% respectivamente menos precipitação anual

Alguns dos cenários considerados são manifestamente extremos face às condições previstas para os Açores mas, dadas as incertezas à data do estudo sobre as “driving forces”, assim como sobre aspectos menos previsíveis tais como eventos abruptos não lineares (Schneider, 2004), optou-se por simular também cenários extremos, de modo a ter um leque de cenários de resposta do aquíferos ao maior conjunto possível de variações das condições climáticas nos Açores. Ou seja, admitiu-se como sendo de importância, analisar também, mesmo se de forma grosseira, o que poderia acontecer em casos de variações climáticas extremas⁴⁶.

Quadro IX – Cenários Teóricos de Incremento de Precipitação Estabelecidos para Analisar a Resposta da Componente Recarga à Alteração da Precipitação (série de precipitação do Cabrito)

Anos	+6 % anual	+10 % anual	+15 % anual	+20 % anual	+25 % anual	+30% anual	Cenário 1 (1)
1990	2964,6	3090,7	3188,9	3356,7	3496,0	3636,6	3084,2
1991	2034,0	2121,0	2188,5	2303,3	2398,7	2495,4	2148,4
1992	1967,5	2051,7	2117,1	2227,6	2320,9	2413,1	2058,5
1993	2262,4	2357,9	2434,0	2560,7	2667,6	2776,1	2394,9
1994	2210,3	2303,4	2377,5	2501,7	2606,2	2711,6	2327,7
1995	2627,6	2739,1	2825,9	2974,3	3098,0	3223,7	2742,6

(1) precipitação a +15% na estação húmida e sem tendência de alteração no Verão

Os cenários de subida de precipitação pretendem de algum modo reflectir quer as possibilidades de subida admitidas pelos modelos Hadley Center, quer os resultados

⁴⁶ O que é distinto de fenómeno climático extremo, que é um evento de extrema intensidade mas muito localizado no tempo. Aqui estamos a falar de variações muito grandes, e eventualmente muito bruscas, do clima mas com uma longa duração após o momento de mudança.

Impactos das Alterações Climáticas: Alterações nos Padrões de Temperatura e Precipitação Devido ao Aquecimento Atmosférico Global

já referidos pelo estudo SIAM (2005), e que para o cenário de emissões B2 refere aumentos de precipitação média anual de até 8-10% no extremo NW da ilha (cf. Fig. 16), com subidas de 20-25% nesta mesma região durante os meses de Inverno (cf. Fig. 15). Assim, os valores de 6 a 10%, pretendem reflectir a variação anual da precipitação para o cenário de emissões B2, embora correctamente o extremo inferior do leque de cenários de precipitação devesse estender-se até aos 0% a +2% de precipitação anual. Os valores de +10% a +30%, embora não pareçam reflectir as indicações obtidas em DROTRH e IA (2001), foram também seleccionados como cenários teóricos porque o IPCC (2002) assinala para a região dos Açores uma tendência de aumento de até 20% ao longo do século XX; ao mesmo tempo, e avaliando os resultados do projecto SIAM (2005) para o período de Inverno, verifica-se que as subidas de precipitação variam de facto entre +10% e +25%, para o cenário de emissões B2, e que, para o caso do cenário de emissões A2 (o mais desfavorável e que em termos globais corresponde a uma redução efectiva anual de precipitação⁴⁷) a região NW tem uma subida de precipitação entre +25% e +30% da precipitação de Inverno. Assim, a escolha destes cenários extremos (valores de variação de precipitação acima de +10%) pretende não apenas fornecer uma imagem mais alargada da variação das recargas face à variação da precipitação como dar imagem, ainda que grosseira, da alteração da precipitação em condições de variações climáticas extremas. Segundo estes cenários, a distribuição das precipitações ao longo do ano será a seguinte (Quadros X e XI):

Quadro X – Distribuição da Precipitação (valores médios) em Cenários Teóricos de Redução de Precipitação (série de precipitação do Cabrito)

Meses	-0.3 mm/dia	-0.5 mm/dia	-1 mm/dia	-15 % anual	-20 % anual	Cenário 30 (1)	Cenário 20 (2)	Cenário 50 (3)	Cenário 60 (4)
Janeiro	189,8	186,4	178,6	166,0	156,2	234,3	234,3	292,9	292,9
Fevereiro	252,0	248,8	241,3	218,5	205,8	308,5	308,5	385,6	385,6
Março	183,8	180,8	173,8	160,4	150,9	202,1	202,1	244,1	244,1
Abril	100,7	98,8	94,6	88,4	83,1	73,3	73,3	73,6	73,6
Mai	145,0	142,3	135,7	127,0	119,6	104,4	104,4	104,4	104,4
Junho	55,0	53,3	49,9	49,0	46,2	41,9	41,9	41,9	41,9
Julho	62,1	60,8	58,0	54,8	51,6	54,8	54,8	54,8	54,8
Agosto	159,7	157,6	152,7	138,9	130,7	138,9	138,9	138,9	138,9
Setembro	123,4	121,5	117,5	107,4	101,1	94,2	77,6	94,2	77,6
Outubro	336,8	332,9	324,1	291,4	274,4	222,9	133,8	222,9	133,8
Novembro	292,8	289,0	280,4	253,9	239,0	194,2	119,5	194,2	119,5
Dezembro	258,9	255,6	241,7	224,6	211,4	235,8	188,6	235,8	188,6

(1) precipitação a -30% Primavera, -15% no Verão, -35% no Outono, +20% no Inverno = -14,9% precipitação anual; (2) precipitação a -30% Primavera, -15% no Verão, -60% no Outono, +20% no Inverno = -25,3% precipitação anual; (3) precipitação a -30% Primavera, -15% no Verão, -35% no Outono, +50% no Inverno = - 5,8% precipitação anual; (4) precipitação a -30% Primavera, -15% no Verão, -60% no Outono, +50% no Inverno = - 15,9% precipitação anual

Nota: -15% anual e -20% anual significa que se afectou a série de uma redução de cerca de 15 e 20% por dia, respectivamente, o que originou 15 e 20% respectivamente menos precipitação anual

⁴⁷ Ou seja, na prática, e dada a variação de valores de precipitação ao longo do ano, o cenário A2 corresponderá a condições de muito maior variabilidade climática e com a probabilidade acrescida de eventos extremos e de um regime de chuvas muito mais concentradas no tempo.

Quadro XI – Distribuição da Precipitação (valores médios) em Cenários Teóricos de Aumento de Precipitação (série de precipitação do Cabrito)

Meses	+6 % anual	+10 % anual	+15 % anual	+20 % anual	+25 % anual	+30% anual	Cenário 1 (1)
Janeiro	253,5	264,3	272,7	287,1	298,9	311,0	275,1
Fevereiro	270,9	281,1	293,9	306,6	319,4	332,2	296,2
Março	197,6	205,0	214,3	223,7	233,0	242,3	216,5
Abril	139,5	145,4	150,0	157,9	164,5	171,2	146,4
Mai	156,4	163,0	168,2	177,0	184,5	192,0	147,6
Junho	69,5	72,5	74,9	78,7	82,1	85,5	65,7
Julho	76,8	80,0	82,6	86,9	90,5	109,1	72,5
Agosto	171,7	178,1	186,2	194,3	202,4	210,5	161,9
Setembro	232,5	242,4	250,1	263,2	274,1	285,2	235,4
Outubro	339,6	354,0	365,2	384,3	400,4	416,4	368,4
Novembro	311,0	324,4	334,5	352,1	366,7	381,4	337,4
Dezembro	278,3	288,8	301,9	315,0	328,2	341,3	265,6

4.3.1.1. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

O trabalho de Azevedo e Gonçalves (2003) parece indiciar uma tendência de subida da precipitação e de leve descida da evapotranspiração real ao longo do século XX, mas esta tendência pode muito bem inverter-se para o período de 2100 (cf. IPCC, 2002, para a zona dos Açores, indica uma subida da precipitação ao longo do século XX, embora os cenários de alteração climática associados às emissões dos gases de efeito de estufa, para o horizonte temporal de 2100 mostra um leve decréscimo da mesma). Por seu lado, para o *cenário de emissões A2* (cf. Figs. 15 e 16) e horizonte temporal de 2100, SIAM (2005) calcula para a ilha Terceira um **decréscimo** geral da precipitação de 0 a 6% na precipitação média anual⁴⁸ (a descida no Verão oscilará entre -20% e -42%, enquanto no Inverno se registará uma subida de 15 a 30%), embora com áreas onde se registre um leve aumento de até 4% (flanco S e W de Santa Bárbara e Guilherme Moniz-Ribeirinha). Para o *cenário B2* (cf. Figs. 15 e 16) e igual horizonte temporal, o mesmo estudo calcula uma tendência de **subida** na precipitação média anual entre 0 a 10%, situando-se os valores médios na ordem dos 4% a 6% (a descida no Verão oscilará entre -15 a -27% e no Inverno regista-se uma subida de 10 a 25%). Se se considerasse apenas a *tendência evolutiva ao longo do século XX*, descrita em DROTRH e IA (2001) e Azevedo e Gonçalves (2003), a precipitação apresentaria uma leve tendência de **subida** da ordem dos 6%; IPCC (2002), apresenta para esta mesma tendência evolutiva ao longo do século XX valores de subida da precipitação entre 10 a 20%.

Deve ser referido que os valores de precipitação apresentados nos Quadros VIII, IX, X e XI foram obtidos a partir da aplicação de modificações lineares das percentagens de variação da precipitação definidoras de cada um dos cenários considerados, a séries de precipitação recentes para a área do Cabrito (área em estudo) de modo a obter séries modificadas de precipitação que reflectam cada um destes

⁴⁸ Tomando a distribuição de temperaturas em toda a área da ilha poderá considerar-se um valor médio de descida de 2% para a precipitação média anual (cf. Fig. 16).

cenários. O ideal seria obter valores de saída dos próprios modelos climáticos, os quais por sua vez se deveriam introduzir no modelo de balanço hídrico mas dificuldades de diversa ordem na obtenção destes dados (de distribuição regionalizada) e a sua introdução no modelo de balanço hídrico impediram a sua utilização, tendo-se por esta razão tido necessidade de realizar esta análise de forma menos sofisticada. Reconhece-se que esta é uma das fraquezas do estudo e deveria no futuro tentar-se avançar para a devida acoplagem dos dados dos modelos climáticos regionais ao modelo de balanço hídrico, o que implicaria um desenvolvimento da estrutura do modelo no sentido do processamento de dados regionalizados.

4.3.2. MODIFICAÇÕES NAS DURAÇÕES E INTENSIDADES DOS EVENTOS DE PRECIPITAÇÃO

Os estudos realizados até ao momento para os Açores (DROTRH e IA, 2001; SIAM, 2005) indicam apenas modificações nos valores médios de precipitação (sazonal e anual), não definindo quaisquer tendências de evolução nas durações e intensidades dos eventos individuais de precipitação. A única informação obtida, para o caso específico da Terceira, e para as simulações do modelo HadRM3 utilizados por SIAM (2005), em relação a esta matéria é a de que pode haver maior tendência (ou susceptibilidade) para a ocorrência de fenómenos extremos de precipitação, dado que ocorre um aumento da precipitação de Inverno associado a uma perda generalizada da precipitação nas outras épocas do ano. Deste modo, e com os resultados existentes, não é ainda possível definir qualquer tendência evolutiva nas durações e intensidades dos diferentes tipos de eventos de precipitação, em termos quantitativos.

A aplicação das tendências de evolução indicadas por cada cenário DROTRH e IA, (2001), IPCC (2002), SIAM (2002), SIAM (2005) às séries individuais de precipitação para a ilha Terceira⁴⁹, também não permite definir tendências de alteração nas durações e intensidades dos eventos individuais de precipitação, pois são transformações lineares simples, capazes de simular a variação da precipitação à escala diária, mensal ou anual, mas incapazes de simular a variabilidade intrínseca, e suas possíveis alterações, a cada evento individual de precipitação. Por exemplo, no caso dum cenário que considera um aumento de 20% da precipitação, a cada evento de precipitação registado numa série aplica-se um factor incremental de 20%, obtendo assim uma nova série que não pode, na realidade simular a verdadeira mutação da precipitação evento a evento produzido por uma elevação do valor médio anual de 20% pois os fenómenos de precipitação são controlados por um conjunto de factores que não têm uma evolução linear mas apresentam uma forte componente de comportamento estocástico que não é possível de ser simulado por este tipo de simplificações. De facto não foi tratada a variabilidade intrínseca do processo de precipitação, eventuais tendências de alteração da variabilidade dos eventos de chuva (eventos mais intensos, mais concentrados, eventos de pico, etc.) e as tendências evolutivas dos fenómenos extremos porque, até mesmo na literatura disponível na altura, estas tendências eram mal conhecidas, pouco estudadas nalgumas das suas vertentes, e sujeitas a uma grande

⁴⁹ Por forma a obter séries de precipitação modificadas, conforme às novas condições, as quais serão os dados de entrada no modelo de balanço hídrico.

margem de incerteza. Esta variabilidade intrínseca do fenómeno precipitação é de grande importância na resposta dos sistemas aquíferos e dos diversos componentes do ciclo hídrico em geral, como aliás se pode observar ao verificar as diferentes respostas para uma mesma área, de diferentes tipos e eventos de precipitação.

Porém, dada a impossibilidade com os dados existentes, de simular os padrões mais complexos de evolução da precipitação, optou-se pela abordagem simplificada realizada em 4.3.1. e 5.3., e da qual se dá aí notícia. Assim sendo, a análise destas séries alteradas de precipitação não permite definir quantitativamente tendências evolutivas na duração e intensidade dos eventos de precipitação.

4.3.3. MODIFICAÇÕES NA FREQUÊNCIA, INTENSIDADE E DISTRIBUIÇÃO ANUAL DE CICLONES, TEMPESTADES TROPICAIS E OUTROS FENÓMENOS EXTREMOS

Na fase actual dos conhecimentos, e mesmo com os recentes estudos sobre as alterações climáticas nos Açores (SIAM, 2005), não é ainda possível criar cenários que reflectam as alterações prováveis nas durações, frequências e intensidades médias de cada tipo de evento de precipitação (de baixa, média ou alta precipitação concentrada), seja ao nível anual, seja ao longo de cada estação do ano. Sem estes cenários uma correcta avaliação de pormenor do impacto das alterações dos regimes e eventos de precipitação nas recargas de aquíferos estará incompleta e sujeita a desvios em termos de previsão efectiva dos impactos sobre os recursos hídricos, em especial se se considerar a possibilidade de uma evolução para regimes de maior variabilidade temporal e em termos de intensidade. Uma correcta avaliação destes impactos deveria considerar os eventos extremos, e a sua evolução – intensidade, frequência, duração, etc. – nos diferentes cenários de alterações climáticas. Contudo, não apenas existe ainda um conhecimento algo limitado sobre estes aspectos como os estudos climáticos para os Açores não abordaram, até ao momento, a questão dos fenómenos extremos, não se conhecendo quaisquer cenários ou tendências evolutivas na duração, frequência ou intensidade dos ciclones, tempestades tropicais, secas e outros fenómenos extremos.

Para o Continente, onde se admitem decréscimos de precipitação da ordem dos 10 a 30%, verifica-se ao mesmo tempo que o número de dias de chuva intensa (> 10 mm) tendem a aumentar e a concentrar-se no Inverno⁵⁰. Tal nível de pormenor não foi ainda alcançado na análise das alterações climáticas dos Açores, pelo que, nesta fase dos conhecimentos não é possível realizar projecções correctas relativas à evolução da frequência e intensidade dos diversos tipos de eventos de precipitação extrema. Prevê-se apenas, como já se referiu atrás, que os Açores possam tornar-se mais susceptíveis a fenómenos extremos de precipitação, dada a evolução prevista das precipitações de Inverno face às das restantes épocas do ano; este risco é provavelmente mais intenso no cenário de emissões A2, dada a maior amplitude de variação entre as precipitações de Inverno e de Verão neste cenário, quando comparado com os valores do cenários B2).

⁵⁰ Informação esta que não seria revelada se simplesmente se aplicasse uma correcção de por exemplo 30% às séries de precipitação existentes.

Impactos das Alterações Climáticas: Alterações nos Padrões de Temperatura e Precipitação Devido ao Aquecimento Atmosférico Global

Quanto às tempestades tropicais e ciclones, a nível global IPCC (2002) refere que a amplitude e frequência dos eventos de precipitação extremos tem 90 a 99% de probabilidade de aumentar, esperando-se a diminuição dos seus períodos de retorno; também sugere que em algumas áreas os picos de intensidade do vento nos ciclones tropicais tem uma 60 a 90% de probabilidade de aumentar 5 a 10%, e a precipitação associada a estes eventos pode subir 20 a 30%, existindo contudo pouca indicação de que possam ocorrer mudanças na frequência destes fenómenos e/ou na sua distribuição geográfica. No caso dos Açores não existe até ao momento informação de pormenor sobre a evolução deste tipo de eventos extremos, tanto ao longo do século XX como em projecções de cenários de alteração climática, não sendo possível, na fase actual dos conhecimentos, traçar qualquer cenário sólido de evolução possível da frequência, intensidade e duração das tempestades tropicais e ciclones que atingem este arquipélago nem calcular o respectivo impacto que poderão ter nas recargas e outros processos ao nível do ciclo hídrico.

Deve ter-se também presente que, no caso dos Açores, o regime das tempestades está subordinado à actividade climática na bacia do Atlântico Norte, onde as tempestades dependem do padrão de distribuição das temperaturas das águas do mar. Assim não apenas a alteração das condições térmicas da atmosfera mas também a evolução da distribuição das temperaturas da água do mar condicionarão as alterações no padrão das tempestades para o Atlântico Norte e para os Açores.

Assim, embora estes aspectos sejam de significativa importância para uma correcta compreensão dos impactos que as alterações climáticas irão colocar aos recursos hídricos superficiais e subterrâneos dos Açores, o grau de conhecimento não é suficiente para se poder adequadamente introduzi-los nas simulações dos balanços hídricos e recarga de aquíferos para cada um dos cenários anteriormente referidos e utilizados neste estudo.

5. IMPACTOS DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS: MUDANÇAS NOS REGIMES DE PRECIPITAÇÃO E SEUS IMPACTOS SOBRE A RECARGA DE AQUÍFEROS

Nas regiões costeiras e insulares, além dos efeitos das alterações do nível do mar sobre os aquíferos (avanço da interface água doce/água salgada e perda de área de aquífero, salinização de aquíferos, etc.), o maior impacto das alterações climáticas sobre os recursos hídricos subterrâneos prende-se com a sua capacidade para modificar os volumes de água disponível para a recarga de aquíferos. As alterações do nível do mar – questão abordada no Anexo 1 – são um fenómeno com potencial importância sobretudo em termos de qualidade das águas subterrâneas mas com um raio de acção localizado e limitado apenas à franja litoral, mesmo que nalguns locais esta franja tenha considerável importância espacial. Afectam assim, apenas, os aquíferos costeiros e os aquíferos de base insulares nas zonas em que estes tenham ligação mais ou menos directa com o mar. Esta ressalva é importante porque, dada a estrutura complexa e com frequência fragmentada em blocos com comunicação hidráulica complexa, dos aquíferos basais nas ilhas, não se deve conceber o funcionamento destes aquíferos de base como uma única unidade homogénea tanto em termos de propriedades hidráulicas como de circulação hidráulica. Assim, embora as zonas litorais destes aquíferos sejam no geral afectadas pelas alterações do nível do mar⁵¹, podem existir sectores interiores que estejam literalmente independentes destes efeitos ou a eles muito pouco vulneráveis, quer por gradientes piezométricos, quer por estruturas vulcânicas delimitarem estes sectores com barreiras impermeáveis. Contudo as alterações do nível do mar têm na sua generalidade um impacto notável nos aquíferos basais/costeiros das ilhas, com particular destaque para as ilhas de topografia baixa e suave (como as ilhas de atol), que são com frequência compostas por materiais de elevada porosidade, podendo nestes casos colocar em risco os seus recursos hídricos subterrâneos. É por esta razão que, apesar de a presente tese não se inserir no âmbito dos estudos costeiros, uma análise sumária deste fenómeno é apresentada no Anexo 1. Essa análise pretende ser apenas um primeiro passo na compreensão dos impactos deste processo sobre os aquíferos litorais e não um estudo completo que, só de per si, seria matéria para tese de doutoramento na área de geologia costeira/dinâmica do litoral. Por esta razão o que foi realizado resumiu-se a uma simples análise da evolução temporal dos dados de observação dos marégrafos, sem qualquer desenvolvimento para processos mais complexos de análise, incluindo a modelação da evolução do nível do mar, especialmente complexa em regiões tectonicamente activas como é o caso dos Açores.

O segundo outro factor de impacto sobre os recursos hídricos subterrâneos é a alteração dos volumes de água disponível para recarga, directamente ligada às mudanças nos regimes dos meteoros, onde se destaca:

1. Alteração nos volumes de precipitação (condicionados pela intensidade, duração e frequência dos eventos de precipitação) e portanto nos volumes disponíveis para escoamento superficial, evapotranspiração e infiltração;

⁵¹ A menos que estejam isoladas do mar por barreiras hidráulicas (ex.: diques, enxames filonianos, etc.)

2. Alteração nas intensidades e duração dos eventos de precipitação, o que pode originar novos regimes de escoamento superficial;
3. Alteração do coberto vegetal (por modificação da temperatura e condições de humidade), com subsequentes impactos na evapotranspiração e, de modo indirecto, nos de escoamento superficial (ex.: a redução da densidade de vegetação, pelo estabelecimento de condições mais áridas, pode promover um maior escoamento superficial aquando dos eventos de precipitação);
4. Alteração das condições térmicas, com consequentes impactos nos volumes de evapotranspiração e de absorção pelo coberto vegetal da água infiltrada.

Para os Açores SIAM (2005) aponta para uma leve tendência de subida da precipitação média anual, e possível tendência no aumento dos eventos de precipitação concentrada (cf. Capítulo 4.3). No entanto um aumento da precipitação concentrada não implica necessariamente um aumento da recarga mas em grande parte dos casos a componente que aumenta é antes o escoamento superficial. Assim, para a recarga de aquíferos não interessa que chova mais num curto espaço de tempo mas sim que a intensidade e frequência das precipitações seja compatível com a capacidade de infiltração dos solos e posterior percolação até aos aquíferos. Em termos simples, um aumento da precipitação durante um dado período do ano não significa necessariamente que a recarga aumentou.

Os mesmos modelos mostram um aumento das temperaturas tanto de Verão como de Inverno, o que pode causar um aumento da evapotranspiração se as condições forem adequadas, retirando assim uma fatia substancial ao volume de água que inicialmente estaria disponível para recarga. O aumento da evapotranspiração, para além de reduzir o volume potencial de água que de outro modo atingiria os aquíferos, tende em condições semi-áridas, a aumentar a salinização dos solos e transmissão de sais aos aquíferos pela posterior infiltração das águas das chuvas nos solos salinizados (SIAM, 2002).

Além dos aspectos estritamente climáticos, é necessário ter em conta as características físicas do meio, com o coberto vegetal e as alterações por este sofrida em resposta às mudanças climáticas, ou as propriedades intrínsecas dos próprios aquíferos, tais como a permeabilidade, a qual condicionará a resposta dos terrenos aos eventos de precipitação, favorecendo a infiltração ou o escoamento superficial, em função da intensidade dos mesmos. Outro aspecto a ter em conta é a dimensão dos aquíferos. SIAM (2002) refere para o caso do Continente português que os pequenos aquíferos não podem beneficiar das chuvas adicionais de Inverno pela simples razão da sua reduzida capacidade de armazenamento, podendo não conseguir compensar os défices de água no Verão⁵²; por seu lado os aquíferos com grande capacidade de armazenamento poderão recuperar os défices de Verão com as eventuais recargas maiores de Inverno.

Sendo que os diversos aspectos relativos aos efeitos das alterações climáticas sobre os aquíferos são complexos, mal conhecidos e por vezes com inter-relações mal conhecidas, optou-se por analisar os impactos das alterações climáticas sectorialmente,

⁵² Isto se o aumento invernal de precipitação significar de facto um aumento da recarga, e não apenas um aumento do escoamento superficial, o que terá de ser analisado caso a caso.

partindo da simplificação, numa primeira fase da análise, de que estes possuem comportamentos independentes. Assim, deixando para os capítulos 6 e 7 a análise da resposta das propriedades intrínsecas dos aquíferos às alterações climáticas e de como esta condicionará a susceptibilidade dos aquíferos a tais alterações, neste capítulo procura-se analisar os efeitos que a variação da precipitação e da evapotranspiração têm sobre os valores da recarga de aquíferos e escoamento superficial, em termos exclusivos de balanço hídrico, excluindo as eventuais alterações às propriedades hidráulicas dos aquíferos que eventualmente possam ser induzidas pelo incremento da alteração devido a estas mesmas alterações climáticas. Considerando ainda as dimensões escalas temporais que afectam os ciclos de recarga e a alteração dos materiais dos aquíferos, admite-se como sendo uma simplificação realista ignorar os efeitos destas alterações dos materiais dos aquíferos para a análise da variação da recarga que neste capítulo se efectua. Esta análise da variação da recarga faz-se a partir dos cenários definidos no capítulo anterior. Deve referir-se ainda uma outra limitação na análise da variação da recarga para os diferentes cenários considerados e que se refere à evapotranspiração: para a correcta avaliação do impacto da alteração da evapotranspiração seria necessário conhecer a modificação do coberto vegetal para cada cenário climático; contudo, como não existe informação relativa a possíveis cenários de alteração da vegetação em resposta a condições modificadas de precipitação e temperatura, e menos ainda a cenários de adaptação/mitigação em termos de actividades humanas (ex.: modificações no tipo de agricultura, produtos produzidos, etc.), restringe-se a análise da componente evapotranspiração apenas aos factores climáticos.

Conhecidas as variações nos valores de recarga e escoamento superficial para os vários cenários de alteração climática – dado não ser possível calcular recargas para os vários tipos de modificações dos eventos de precipitação (tipo, duração, intensidade), uma vez que esta informação não é conhecida (cf. Capítulo 4.3.2) – e definidos o(s) regime(s) de recarga global resultante(s), procurou-se:

- Determinar: (1) o volume anual escoado pelas nascentes e a percentagem que nele corresponde por aquífero a recarga directa, admitindo que a relação recarga directa/caudais se mantém (ou caso não se mantenha, determinar a relação para cada cenário de alteração climática); (2) a variação destes caudais por cenário considerado, em percentagem de recarga directa escoada pelas nascentes e as percentagens perdidas por drenância⁵³ para os aquíferos subjacentes;
- Identificar e delimitar as áreas que ficam afectadas por estas alterações e a variação da extensão das áreas de recarga associadas, indicando igualmente as regiões onde se pode esperar que a capacidade de infiltração se modifique e em que sentido (aumento ou decréscimo; cf. Quadro XLVII);
- Cartografar as áreas de recarga e de descarga dos sistemas hidrogeológicos, definindo as respectivas variações espaciais e de valor de recarga registadas para os diversos cenários de alterações climáticas.

De referir que relativamente às áreas onde ocorre a recarga preferencial dos aquíferos, não foi possível realizar a variação da sua extensão em termos cartográficos,

⁵³ Considerou-se que a drenância se manteria constante, dado não existir informação suficiente que permitisse inferir da eventual modificação desta.

uma vez que os dados para a delimitação destas áreas à data da realização deste trabalho eram ainda insuficientes.

5.1. Efeitos das Variações nos Regimes e Intensidades de Precipitação sobre a Recarga de Aquíferos

Neste sub-capítulo realiza-se a análise dos efeitos da alteração dos valores de precipitação (com base nos cenários teóricos definidos no Capítulo 4) sobre a recarga para as condições previstas como futuras dos Açores.

O estudo de SIAM (2005) definiu para os Açores um conjunto de cenários de alteração climática, igualmente discutidos no Capítulo 4. Com base nestes cenários procurou-se definir a variação das intensidades, durações e frequências dos diferentes tipos de eventos de precipitação ao longo do ano hidrológico (valores médios) para o período de 2070-2100. Porém, como os resultados do estudo SIAM (2005), o mais detalhado sobre a análise das alterações climáticas em termos meteorológicos para os Açores, não eram suficientemente pormenorizados para analisar tendências de evolução para cada tipo de evento, não foi possível criar cenários detalhados de variação das características da precipitação, restringindo-se assim a análise dos impactos da variação das precipitações sobre a recarga aos valores médios admissíveis de precipitação (para cada cenário).

Também não foi possível traçar com o detalhe necessário a evolução para a mesma época da frequência dos eventos de precipitação intensa, nem da frequência e intensidade das precipitações dos ciclones e tempestades tropicais que possam atingir os Açores.

Deste modo, e apesar dos grandes avanços verificados com o estudo de SIAM (2005) para os Açores, o quadro climatológico é manifestamente incompleto, forçando ao uso de cenários teóricos para compreender as alterações da recarga versus precipitação induzidas pelas alterações climáticas. Deve atender-se a que sendo, cenários muitíssimo simplificados, a resposta da recarga a estas condições teóricas pode afastar-se de modo significativo da realidade futura induzida pelas alterações do clima.

Para melhor compreender a forma como a recarga pode variar com a precipitação, não apenas considerámos os cenários desenvolvidos para os Açores a partir dos trabalhos de SIAM mas também foram considerados outros cenários teóricos, em que as condições de variação da precipitação são distintas. É este conjunto de resultados que se apresenta ao longo dos sub-capítulos seguintes.

5.1.1. DETERMINAÇÃO DOS EFEITOS DAS ALTERAÇÕES DE REGIMES E INTENSIDADES DE EVENTOS DE PRECIPITAÇÃO SOBRE A RECARGA DE AQUÍFEROS NOS AÇORES

Nos sub-capítulos que se seguem realiza-se um enquadramento genérico da problemática do cálculo da recarga e faz-se a análise da variação dos valores desta mesma recarga para os Açores, partindo dos cenários teóricos definidos no Capítulo 4 de alteração de temperatura, evapotranspiração, precipitação e fenómenos extremos.

5.1.1.1. METODOLOGIAS DE CÁLCULO DA RECARGA DE AQUÍFEROS

Para a determinação das recargas existe um conjunto de metodologias, das quais se dá conta sumária abaixo:

- ◆ **método do balanço sequencial diário (modelo BALSEQ)** – este é um modelo matemático de balanço hídrico sequencial desenvolvido por Lobo Ferreira (1981, 1982) que toma em consideração o tipo de solo e a ocupação vegetal do mesmo; o escoamento superficial é calculado de acordo com o método do número característico de escoamento do U.S. Soil Conservation Service, sendo consideradas perdas iniciais de precipitação de modo a admitir a saturação do nível superior do solo no início das chuvas, ocorrendo a recarga sempre que a humidade do solo excede o produto entre a espessura da zona radicular pela diferença entre a retenção específica e o ponto de emurchecimento; assim a recarga é o volume de água que não é aproveitado pelas raízes, ultrapassada a região radicular.
- ◆ **método dos hidrogramas de ribeiras** – o método, que basicamente consiste na separação do escoamento total de uma bacia hidrográfica em escoamento directo e em escoamento de base, sendo este uma medida do volume hídrico que recarregou as águas subterrâneas, foi desenvolvido por Oliveira *et al.* (1997) no âmbito de um Protocolo de Cooperação entre o INAG e o LNEC; a determinação do escoamento de base numa bacia hidrográfica, obtida pela análise dos hidrogramas de escoamento permite a estimativa da recarga de unidades produtivas. 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. Para a decomposição do hidrograma indicam-se os seguintes métodos: (1) Decomposição do escoamento total, apresentado em Shirmohammadi *et al.* (1984); (2) Translação da curva de esgotamento, apresentado em Rutledge e Daniel (1994). Para o cálculo da recarga Oliveira (1997) e Oliveira (2004) integra um método baseado na curva de esgotamento com o método de decomposição de escoamento total: (1) eventos de precipitação cujo escoamento directo não se sobreponha ao escoamento directo gerado pelo evento de precipitação anterior, o método funciona como o da decomposição do escoamento total; (2) se há sobreposição de episódios de precipitação, usa-se o coeficiente de esgotamento para separar os escoamentos totais provocados por cada chuvada.
- ◆ **método dos hidrogramas dos caudais de nascentes** – neste método toma-se em consideração que o somatório do caudal de um conjunto de nascentes que drene um determinado aquífero (se não afectado por qualquer outro tipo de extracções) nem perdas difusas para aquíferos subjacentes ou cursos de água que o atravessarem equivale à recarga eficaz recebida por esse aquífero. Neste estudo, considerando os poucos dados existentes para cada unidade produtiva tanto em termos de caudais de nascentes como dos próprios limites precisos dos mesmos, assim como a quase total ausência de hidrogramas de nascentes para as várias ilhas, optou-se por uma abordagem global da recarga, considerando não a área da unidade produtiva mas de toda a ilha uma vez que

uma ilha se pode considerar um sistema fechado ou quase; as exceções referem-se aos casos de nascentes submarinas, que podem ser por vezes ser muito importantes. Nestas condições a recarga foi considerada como o somatório das descargas anuais de todas as nascentes da ilha, a que se associou o volume de água captada dos aquíferos por poços, furos e galerias.

- ◆ **método da variação dos níveis piezométricos** – este método (Oliveira *et al.*, 1997) baseia-se no facto de que, se se puder considerar reduzida a variação do nível piezométrico devida a escoamento subterrâneo, a subida do nível piezométrico, ΔH , é relacionada com a recarga R , a qual é o volume de água remanescente da precipitação após subtraídos os processos de evapotranspiração, escoamento directo e preenchimento da capacidade utilizável do solo; no caso de uma região plana o escoamento superficial é nulo a quase nulo e para intervalos de tempo diários a evapotranspiração é muitas vezes desprezável em relação à precipitação ocorrida, em particular nos meses de Inverno; nestas condições e quando a capacidade de campo está preenchida pode admitir-se que a recarga é aproximadamente igual à precipitação (Oliveira *et al.*, 1997).
- ◆ **método expedito para determinação da recarga potencial de aquíferos (modelo de Vermeulen)** – este método, desenvolvido por Vermeulen *et al.* (1993, 1994), baseia-se nos resultados de múltiplas aplicações do modelo de balanço hídrico sequencial diário BALSEQ (Lobo Ferreira, 1982), a partir de dados de precipitação registados em 10 postos udométricos distribuídos ao longo de Portugal Continental. O método requer como dados de entrada: (1) precipitação média anual; (2) AGUT: quantidade de água no solo utilizável para evapotranspiração; (3) NC: número característico de escoamento. O número característico de escoamento (NC) depende do tipo de solo, do uso do solo e de uma condição de superfície do solo para gerar escoamento superficial; o seu valor varia entre 0 e 100, correspondendo 0 a uma bacia onde não há escoamento superficial, qualquer que seja a precipitação e a sua intensidade, e 100 a uma bacia em que toda a precipitação esco superficialmente. A quantidade de água no solo utilizável na evapotranspiração (AGUT), define-se pelo produto da profundidade das raízes das plantas com a capacidade utilizável do solo. O escoamento superficial (E_s) depende apenas da precipitação (P) e do número característico de escoamento (NC), enquanto neste método a evapotranspiração real (ETR) é calculada a partir da variável AGUT e da infiltração superficial (TI), definida como a diferença entre a precipitação total e o escoamento superficial; finalmente, após a estimação dos valores de E_s e de ETR, calcula-se a recarga de aquíferos (R) através da expressão $R = P - E_s - ETR$.
- ◆ **método do balanço hídrico sequencial de Thornthwaite e Mather** - o método de Thornthwaite e Mather aplica sequencialmente para um dado intervalo de tempo a equação do balanço hídrico, por forma a calcular os excedentes hídricos; contudo tem a limitação de apenas calcular estes excedentes que são de facto o somatório de duas parcelas: (1) o escoamento superficial, (2) a infiltração eficaz ou recarga propriamente dita. A recarga apenas pode ser calculada se existir uma quantificação do escoamento superficial.

- ◆ **método do balanço dos cloretos** – o método do balanço dos cloretos baseia-se no facto do ião cloreto possuir uma elevada constante de solubilidade, ser regra geral inerte (não reactivo) e não ocorrer de modo natural na maior parte dos meios rochosos, sendo a equação do balanço hídrico expressa por: $P_{\text{global}} \times C_p - ESC_{\text{superficial}} \times C_{\text{esc}} - R \times C_r + Q - \text{Erro} = 0$ onde: C_p = concentração de cloretos na precipitação global; C_{esc} = concentração de cloretos no escoamento superficial; C_r = concentração de cloretos na água das exsurgências (assumida como volume de recarga); Q = fracção de cloretos que provém da água da chuva mas também de brisas e aerossóis marinhos.
- ◆ **métodos isotópicos** – apenas fornece resultados fiáveis quando se intersecta uma grande espessura da coluna de água (sendo preferível esta referir-se à totalidade de espessura saturada do aquífero), ou seja, quando engloba águas de várias idades. Como consequência da fraccionação entre a fase água da chuva e a fase água subterrânea é possível determinar a recarga. Esta pode calcular-se em m/ano, segundo Bedmar *et al.* (1998) a partir da equação:

$$\text{Eq. 3: } R_m = \frac{\phi \times C_m \times \Delta h}{\int_{1952}^t \frac{P(t')}{P_m} \times C_0(t') \times e^{-\lambda(t-t')} dt}$$

Onde:

R_m = recarga média

Φ = porosidade média do aquífero,

C_m = concentração média de trítio na água extraída por bombagem,

Δh = espessura da zona saturada (ou espessura da coluna de água do furo, em metros),

$P(t)$ = função da precipitação ao longo dos anos,

P_m = precipitação anual média,

$C_0(t)$ = função da entrada de trítio no aquífero,

λ = constante de desintegração do trítio (anos^{-1}).

Conhecido o valor de C_m e sabendo-se os valores de porosidade e espessura saturada do aquífero assim como os valores de trítio na água da chuva calculados pelo modelo atmosférico do local em análise pode determinar-se então uma **recarga média do aquífero** (Bedmar *et al.*, 1998).

No arquipélago dos Açores a recarga tem sido determinada a partir dos métodos de Thornthwaite e Mather (Coutinho, 1990; Cruz, 1992; Cruz, 1997), dos cloretos (Cruz, 1992; Cruz, 1997), e BALSEQ (Lobo Ferreira, 1991; Novo *et al.*, 1997; Novo *et al.*, 2001). Neste estudo, embora tivesse sido equacionada a possibilidade de utilização de um conjunto de modelos capazes de se complementar entre si para as diversas situações topográficas, acabou por se utilizar apenas o modelo BALSEQ, devido não apenas ao tipo de dados disponíveis para a ilha Terceira⁵⁴ mas, sobretudo, porque o que se pretende é a análise da variação das recargas em função dos volumes de precipitação calculados pelos modelos climáticos.

⁵⁴ Considerou-se que, para o tipo e qualidade de dados existentes o modelo BALSEQ dava resultados mais detalhados do que o modelo de Thornthwaite, que tem sido utilizado em diversos estudos hidrogeológicos da região dos Açores.

Os métodos que se baseiam nas determinações de hidrogramas de ribeiras, escoamentos de nascentes, evolução de níveis piezométricos, não podem ser utilizados porque os parâmetros que exigem não são simuláveis pelos modelos climáticos, dado que utilizam como dados de entrada parâmetros que, quando muito, poderão ser extrapolados a partir dos dados de saída dos modelos. Contudo esta extrapolação é complexa e, na actual fase de conhecimentos para os Açores, dificilmente efectuável dado que é mal conhecida a situação de referência. Por exemplo existiam, à data da realização deste trabalho, muito poucos dados para construir hidrogramas das ribeiras dos Açores, na sua quase totalidade temporárias, com grandes variações de caudais, e portanto de difícil monitorização; os dados sobre os caudais de nascentes na Terceira eram também muito limitados, em especial no que toca à sua evolução ao longo do ano⁵⁵; os dados relativos à piezometria concentram-se apenas num sector da ilha (o que tem com efeito a quase totalidade dos furos de captação), deixando toda a restante ilha por caracterizar.

No caso dos cloretos a sua concentração depende da velocidade média dos ventos, precipitação e temperatura (Rodrigues *et al.*, 1999) mas os dados disponíveis não permitem ainda criar cenários de distribuição dos cloretos para a ilha Terceira em função dos diferentes cenários de alteração climática, não permitindo assim calcular recargas para cada um destes cenários.

O modelo BALSEQ foi usado para as áreas de declives pouco acentuados. Em zonas de declives muito acentuados considerou-se que o processo preponderante é o escoamento superficial e a recarga muito reduzida, pelo que não se procedeu ao seu cálculo.

5.1.1.2. DETERMINAÇÃO DA RECARGA DE AQUÍFEROS NOS AÇORES PARA DIFERENTES CENÁRIOS ADMITIDOS DE ALTERAÇÃO DOS REGIMES DE PRECIPITAÇÃO

A determinação da recarga foi realizada para os cenários já apresentados no Capítulo 4, que consideram máximos e mínimos admissíveis de alteração térmica e de precipitação para a faixa de latitudes e longitudes dos Açores, em termos diários (precipitação) e mensais (evapotranspiração). Não foi possível, pelas razões já anteriormente explanadas (cf. Capítulo 4), realizar a análise das alterações da recarga para possíveis mudanças de:

- ◆ Durações, intensidades e regimes dos eventos de precipitação;
- ◆ Regime, frequência, duração e intensidade média dos eventos de precipitação concentrada;
- ◆ Frequência, duração e intensidade média dos ciclones e outras tempestades tropicais.

Uma vez definidos os vários cenários climáticos, e aplicados ao cálculo da recarga, analisou-se a alteração nos valores da recarga em cada cenário, para

⁵⁵ Sendo que no caso das nascentes em que este registo prolongado ao longo do tempo existe, se verifica variações muito drásticas de caudais ao longo do tempo, dificultando a realização de extrapolações.

compreender como as alterações climáticas poderão afectar não só os volumes de recarga mas também os caudais das nascentes, a variação espacial das áreas de recarga e os volumes de água disponíveis para consumo. A metodologia aconselhada para a obtenção destes resultados é:

- 1º - Definir as variações nos valores de recarga e escoamento superficial para os vários cenários de alteração climática;
- 2º - Identificar e delimitar as áreas afectadas por estas alterações e assim como a variação da extensão das áreas de recarga;
- 3º - Cartografar as áreas de recarga e de descarga dos sistemas hidrogeológicos, definindo as respectivas variações espaciais e de valor de recarga registadas para os diversos cenários de alterações climáticas;
- 4º - Determinar o volume anual escoado pelas nascentes e a percentagem que deste corresponde por aquífero a recarga directa;
- 5º - Pressupondo que a relação recarga directa/caudais se mantém (ou caso não se mantenha, calcular a relação em cada cenário de alteração climática), calcular a variação destes caudais cenário a cenário, em percentagens de recarga directa escoada pelas nascentes e, se possível, percentagens perdidas por drenância para os aquíferos subjacentes.

A análise do impacto das alterações da precipitação diária e evapotranspiração real mensal na recarga, inicia-se pela aplicação do modelo BALSEQ (Lobo Ferreira, 1981; Lobo Ferreira, 1982; Lobo Ferreira e Rodrigues, 1988) para cenários de variação só da precipitação, depois de variação da evapotranspiração e por fim de ambas as variáveis, considerando sempre constantes as condições físicas do aquífero e respectivo coberto vegetal (isto é os parâmetros AGUT e NC).

O facto de se considerarem os parâmetros NC e AGUT constantes deriva de que se procura simular os impactos das alterações climáticas sobre um mesmo aquífero (no caso exemplo: o Cabrito, dado ser esta a zona sobre a qual se tem mais informação sobre características de solos e coberto vegetal). Contudo, para esta região existe um conjunto de pares NC/AGUT representativos de distintos sistemas solo/vegetação, que são comuns nas zonas de recarga da ilha. Pode assim considerar-se que este conjunto de pares NC/AGUT (solos/coberto vegetal) é aproximadamente representativo da maioria das condições físicas intrínsecas das zonas de recarga na ilha Terceira.

Embora seja discutível se os parâmetros NC e AGUT permanecem inalteráveis perante alterações climáticas, quer porque os processos erosivos e de alteração química podem modificar as propriedades hidráulicas dos solos⁵⁶, ou porque o coberto vegetal se poderá alterar numa resposta natural às mudanças meteorológicas, ou ainda pelas alterações que o Homem induza tanto no solo como no coberto vegetal (ex.: alteração das práticas agrícolas como resposta às novas condições climáticas), optou-se por admitir que estes variam de modo significativamente mais lento que os parâmetros meteorológicos e portanto, para efeitos de modelação, podem considerar-se constantes.

⁵⁶ Um clima mais quente e húmido promove uma alteração mais intensa nos materiais, originando produtos de alteração com um grande teor de argilas, e admissivelmente mais rápida.

Impactos das Alterações Climáticas: Mudanças nos Regimes de Precipitação e seus Impactos sobre a Recarga de Aquíferos

Para analisar apenas o efeito da alteração da precipitação, admitiram-se como condições de base para o Grupo de Cenários 1 (**Redução da Precipitação**):

1. condições de AGUT e NC da região do Cabrito, ilha Terceira, definidas em Novo *et al.* (1997);
2. condições de evapotranspiração real idênticas às registadas durante a década de 90 para a região do Cabrito;
3. série de precipitação diária conhecida para o Cabrito na década de 90, mas alterada de acordo com cenários de alteração climática teóricos, já definidos no Capítulo 5 e que tomaram como ponto de partida os cenários definidos por SIAM (2001) para Portugal Continental. Para a criação destas séries alteradas considerou-se a janela temporal de 100 anos, portanto as precipitações são alteradas conforme os acréscimos ou decréscimos que se prevê venham a ser registados no período 2080-2100 pelos cenários de alteração climática referidos.

Sob tais condições, os resultados das simulações BALSEQ foram (Quadro XII, Fig. 27):

Quadro XII – Variação das Recargas num Mesmo Aquífero Face a Redução das Precipitações

		Cenários de Variação da Precipitação								
		- 0,3 mm/d	- 0,5 mm/d	- 1 mm/d	- 15% anual	- 20% anual	Cenário 30 (1)	Cenário 20 (2)	Cenário 50 (3)	Cenário 60 (4)
AGUT/NC	Humidade do solo	Recarga versus séries alteradas de precipitação para o Cabrito (mm/ano)								
186/91	185	589,2	567,5	514,9	517,6	479,1	518,2	419,9	576,0	481,3
	100	575,0	553,3	500,7	503,4	464,9	504,1	405,8	561,8	467,1
182/75	181	1168,1	1140,0	1071,4	995,7	921,0	1004,5	827,8	1131,9	961,6
	100	1154,6	1126,5	1057,9	982,2	907,5	991,0	814,3	1118,4	948,1
105/56	100	1459,8	1431,0	1359,1	1225,8	1130,9	1237,7	1022,7	1412,8	1204,6
105/1	100	1558,3	1528,8	1455,3	1286,7	1181,1	1291,6	1061,1	1492,4	1268,7
99/83	100	1005,6	980,9	921,6	878,4	820,9	884,9	739,3	981,4	841,2
97/61	100	1422,8	1394,5	1323,9	1201,9	1111,3	1214,2	1006,5	1379,6	1178,8
56/38	100	1601,3	1573,2	1501,9	1335,9	1232,4	1244,9	1116,5	1540,9	1319,4
	55	1593,8	1565,7	1494,4	1328,4	1224,9	1337,4	1109,0	1533,4	1311,9
18/90	100	852,8	833,6	786,7	773,1	733,8	775,7	671,8	838,0	738,0
	17	838,9	819,8	772,8	759,2	720,0	761,8	657,9	824,2	724,2
Valor Médio		1151,7	1126,2	1063,4	982,4	910,7	980,5	821,1	1115,9	953,7

Impactos das Alterações Climáticas: Mudanças nos Regimes de Precipitação e seus Impactos sobre a Recarga de Aquíferos

		Cenários de Variação da Precipitação								
		- 0,3 mm/d	- 0,5 mm/d	- 1 mm/d	- 15% anual	- 20% anual	Cenário 30 (1)	Cenário 20 (2)	Cenário 50 (3)	Cenário 60 (4)
AGUT/NC	Humidade do solo	Recarga versus séries alteradas de precipitação para o Cabrito (%)								
186/91	185	-5,7	-9,2	-17,6	-17,2	-23,3	-17,1	-32,8	-7,8	-23,0
	100	-5,8	-9,4	-18,0	-17,6	-23,9	-17,4	-33,5	-8,0	-23,5
182/75	181	-3,9	-6,2	-11,8	-18,0	-24,2	-17,3	-31,9	-6,8	-20,8
	100	-3,9	-6,2	-11,9	-18,2	-24,5	-17,5	-32,2	-6,9	-21,1
105/56	100	-3,1	-5,0	-9,8	-18,7	-25,0	-17,9	-32,1	-6,3	-20,1
105/1	100	-3,0	-4,8	-9,4	-19,9	-26,5	-19,6	-33,9	-7,1	-21,0
99/83	100	-3,9	-6,2	-11,9	-16,0	-21,5	-15,4	-29,3	-6,2	-19,6
97/61	100	-3,2	-5,1	-9,9	-18,2	-24,4	-17,4	-31,5	-6,1	-19,8
56/38	100	-2,8	-4,5	-8,8	-18,9	-25,2	-24,4	-32,2	-6,4	-19,9
	55	-2,8	-4,5	-8,8	-19,0	-25,3	-18,4	-32,3	-6,5	-20,0
18/90	100	-3,5	-5,6	-10,9	-12,5	-16,9	-12,2	-24,0	-5,1	-16,5
	17	-3,5	-5,7	-11,1	-12,7	-17,2	-12,4	-24,3	-5,2	-16,7
Valor Médio		-3,7	-6,0	-11,7	-17,2	-23,1	-17,2	-30,8	-6,5	-20,2

(1) precipitação a -30% Primavera, -15% no Verão, -35% no Outono, +20% no Inverno = -14,9% precipitação anual
 (2) precipitação a -30% Primavera, -15% no Verão, -60% no Outono, +20% no Inverno = -25,3% precipitação anual
 (3) precipitação a -30% Primavera, -15% no Verão, -35% no Outono, +50% no Inverno = - 5,8% precipitação anual
 (4) precipitação a -30% Primavera, -15% no Verão, -60% no Outono, +50% no Inverno = - 15,9% precipitação anual
 Nota: -15% anual e -20% anual significa que se afectou a série de uma redução de cerca de 15 e 20% respectivamente por dia, o que deu 15 e 20% respectivamente menos precipitação anual

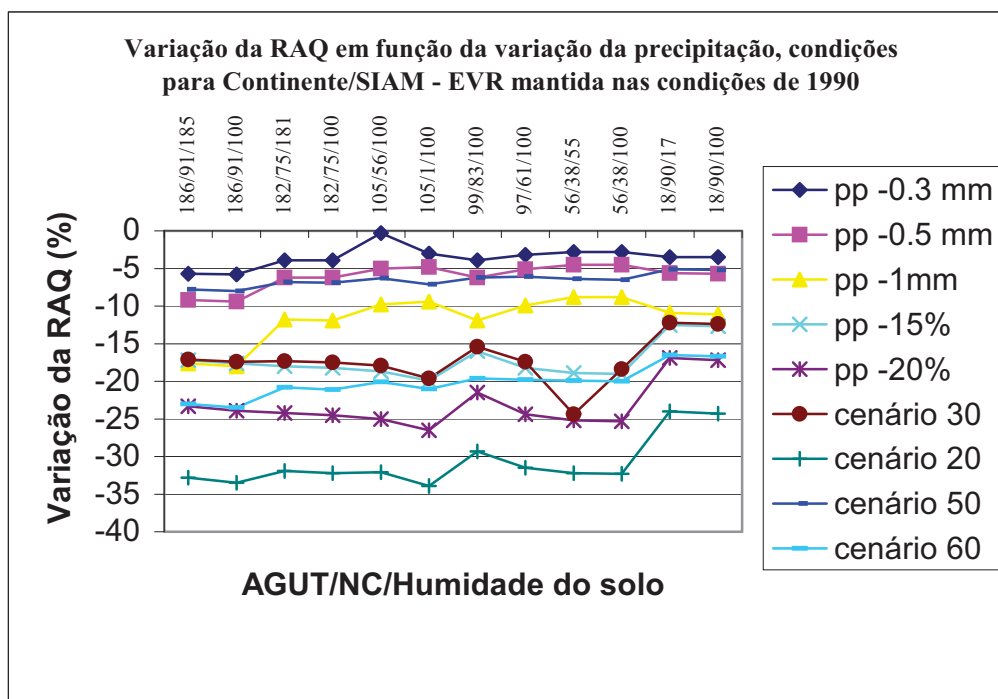


Figura 27 – Variação (em % de variação) da Recarga em Cenários Teóricos Baseados na Possível Variação da Precipitação no Sentido da Descida, Aplicados às Séries de Precipitação para o Cabrito (ilha Terceira)

Se nestes cenários se comparar a variação da precipitação com a recarga verifica-se que (Quadros XII e XIII):

**Quadro XIII – Variação da Recarga (valor médio anual) num Mesmo Aquífero
Face a Variação das Precipitações (% de Descida)**

	Cenários de Variação da Precipitação					
	- 15% anual	- 20% anual	Cenário 30 (-14,9%)	Cenário 20 (-25,3%)	Cenário 50 (-5,8%)	Cenário 60 (-15,9%)
AGUT/NC	Factor de multiplicação entre o valor de descida da precipitação e o de descida da recarga					
186/91	1.17	1.20	1.17	1.32	1.38	1.48
182/75	1.21	1.23	1.17	1.27	1.19	1.33
105/56	1.25	1.25	1.20	1.27	1.09	1.26
105/1	1.33	1.33	1.32	1.34	1.22	1.32
99/83	1.07	1.08	1.03	1.16	1.07	1.23
97/61	1.21	1.22	1.17	1.25	1.05	1.25
56/38	1.26	1.26	1.64	1.27	1.10	1.25
18/90	1.17	0.85	0.82	0.95	0.88	1.04

a) Nos solos com elevada capacidade de infiltração e ocupação vegetal de tipo arbustivo/arbóreo (assinalado a azul) a variação da recarga com a variação da precipitação tende a ser a mais elevada, indiciando grandes perdas de recarga, em especial nos cenários de variação percentual e muito em especial quando esta variação percentual não é constante ao longo do ano. As maiores perdas de recarga surgem nos cenários de maiores perdas de precipitação no Outono (embora, para perdas semelhantes no Outono, a perda de recarga possa de algum modo ser contrabalançada se a precipitação de Inverno tiver um acréscimo muito significativo), o que indica a importância da resposta do coberto vegetal às alterações sazonais nos regimes de chuvas.

b) Em regra as maiores perdas de recarga ocorrem para os pares gramíneas/solos de baixa permeabilidade (assinalado a verde); estas perdas seguem de muito perto a redução na precipitação, havendo pequenos desvios quando os cenários comportam variações sazonais na alteração da precipitação⁵⁷, sendo praticamente sempre inferiores aos valores de redução desta última (a exceção é o Cenário 60).

c) Solos de baixa permeabilidade e ocupação vegetal arbórea (a rosa) apresentam perdas de recarga muito sensíveis, sempre claramente superiores às perdas da precipitação, e que se tornam especialmente significativas nos cenários de redução das precipitações de Outono, mesmo que as precipitações de Inverno aumentem até 50%. Isto indicia a importância, em solos de elevada capacidade de escoamento, do tipo de coberto vegetal e dos regimes de precipitação sazonal da precipitação no controle da recarga.

d) Os solos de permeabilidade intermédia (assinalados a amarelo) mostram no geral um comportamento semelhante de perda de recarga tanto para um coberto vegetal arbóreo como de gramíneas, indiciando que nestas situações é a infiltração que parece reger o processo⁵⁸.

⁵⁷ Os Cenários 20, 30, 50 e 60, onde a variação da precipitação ao longo do ano não é constante.

⁵⁸ Refira-se o caso um pouco anómalo do par AGUT/NC = 56/38, para o Cenário 30 e humidade inicial do solo = 100, que apresenta a maior perda (em percentagem) de recarga.

Nas Figs. 28 e 29 apresenta-se a correlação entre a variação das recargas em função das precipitações, respectivamente para percentagens e valores de mm/ano.

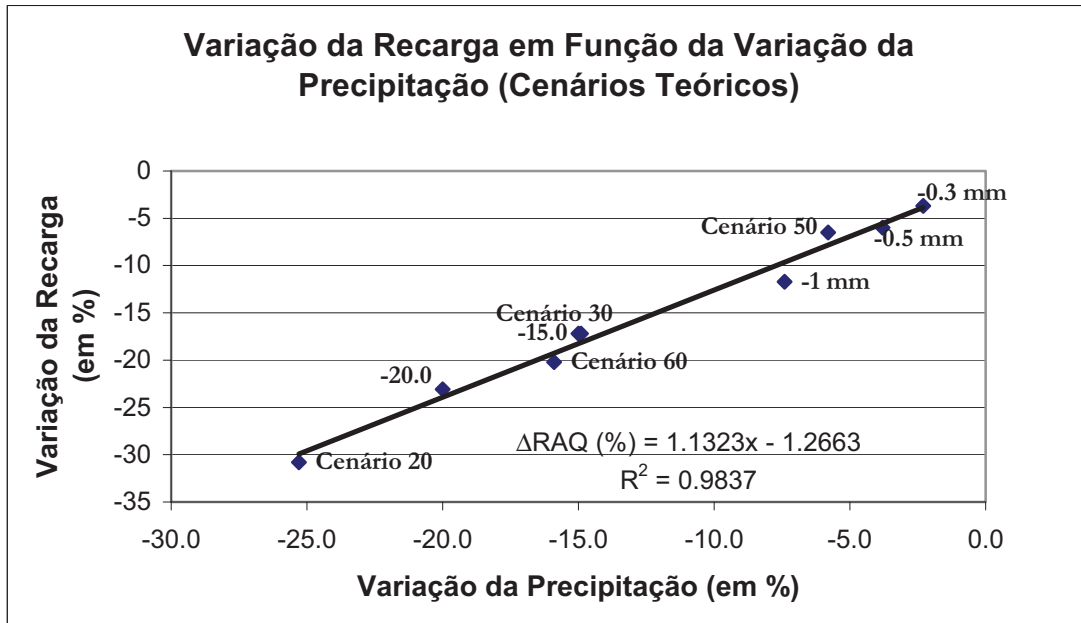


Figura 28 – Correlação da Variação (em %) da Recarga versus Variação da Precipitação (Cenários Teóricos Baseados na Possível Variação da Precipitação no Sentido da Descida, Aplicados às Séries de Precipitação para o Cabrito - ilha Terceira)

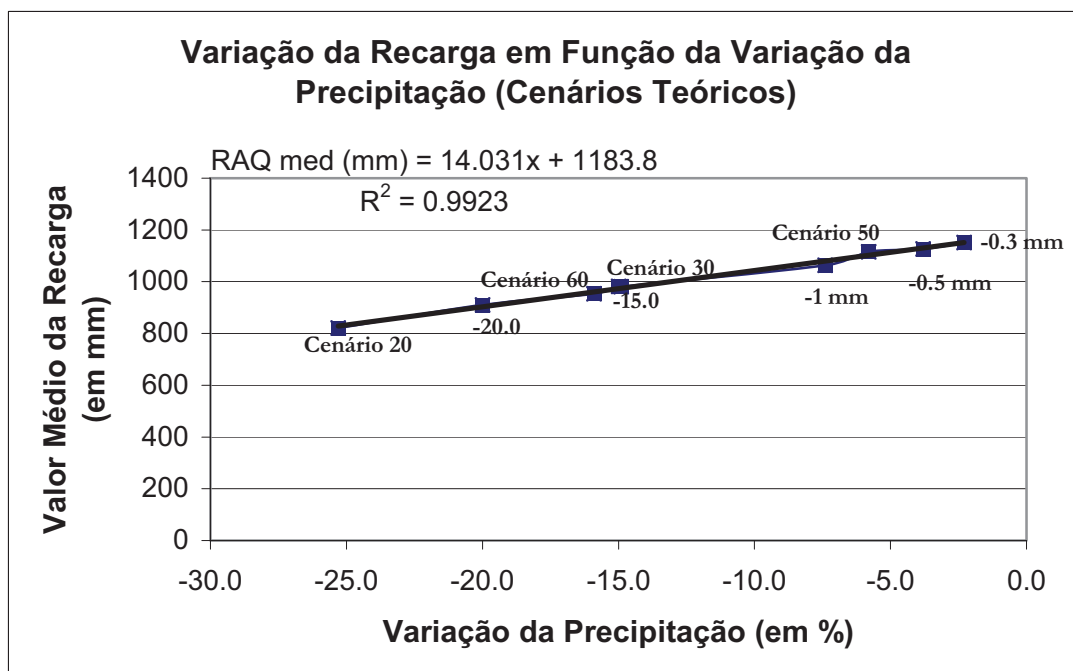


Figura 29 – Correlação do Valor Médio (em mm) da Recarga versus Variação da Precipitação (Cenários Teóricos Baseados na Possível Variação da Precipitação no Sentido da Descida, Aplicados às Séries de Precipitação para o Cabrito - ilha Terceira)

Para os cenários de descida da precipitação os resultados são os acima apresentados. Estes cenários representarão de algum modo tanto as condições da maior parte da ilha Terceira no cenário de emissões A2, e, para os cenários mais extremos, as condições de Verão deste mesmo cenário de emissões. Refira-se que, para os Açores, descidas de precipitação são também calculadas por modelos globais de alteração climática (GCM's) – vide Fig. 7 – na ordem de grandeza entre 0,5 a 1 mm/dia.

Deve mais uma vez ressaltar-se que calcular-se variações de recarga apenas tomando em conta a alteração da precipitação tem uma validade restrita em termos de representação do fenómeno real, devido não só ao vasto grau de incerteza associado aos dados de chuva acoplados com a evapotranspiração e a temperatura, como porque a precipitação não é o único factor que influencia a recarga. Assim os valores agora apresentados devem ser tomados como resultados teóricos para avaliação do impacto que cada factor (neste caso a alteração da precipitação) tem sobre a variação efectiva da recarga. Só decompondo cada um dos factores controladores da recarga e estudando-os primeiro em separado, acoplando-os mais tarde, será possível compreender como cada meteoro e as respectivas alterações influenciam no resultado final.

Como o cenário de emissões B2 (o mais conservativo) SIAM (2005) prevê um aumento das precipitações, os efeitos da subida da precipitação sobre as recargas foram também simulados, usando os cenários já definidos no Capítulo 4, admitindo como condições de base:

1. condições de AGUT e NC da região do Cabrito, ilha Terceira, definidas em Novo *et al.* (1997);
2. condições de evapotranspiração real idênticas às registadas durante a década de 90 para a região do Cabrito;
3. série de precipitação diária conhecida para o Cabrito na década de 90, mas alterada segundo um conjunto de valores teóricos progressivamente mais elevados, pretendendo reflectir uma tendência de subida da precipitação média anual, o que, pelos dados de estudos preliminares (Azevedo e Gonçalves, 2003) parece poder vir a ser a situação de evolução para os Açores.

Para estas condições teóricas, os resultados das simulações foram os seguintes (Quadro XIV, vide também Fig. 30):

Quadro XIV – Variação das Recargas num Mesmo Aquífero Face a Subida das Precipitações

		Cenários de Variação da Precipitação						
		+ 6%	+ 10%	+ 15%	+ 20%	+ 25%	+ 30%	Cenário 1 (1)
AGUT/NC	Humidade do solo	Recarga versus séries alteradas de precipitação para o Cabrito (mm/ano)						
186/91	185	657,9	686,5	708,8	744,5	774,1	803,8	692,2
	100	643,7	672,3	694,7	730,4	759,9	789,6	678,0
182/75	181	1293,1	1356,4	1405,5	1486,2	1552,4	1618,2	1364,2
	100	1279,6	1342,9	1392,0	1472,7	1538,9	1604,8	1350,7
105/56	100	1611,0	1693,8	1758,4	1866,4	1955,6	2044,8	1711,5
105/1	100	1728,5	1825,9	1902,4	2032,0	2140,3	2249,6	1846,8
99/83	100	1103,3	1149,5	1185,5	1244,2	1292,0	1339,6	1161,6
97/61	100	1568,3	1646,4	1707,2	1808,8	1892,7	1976,5	1663,8
56/38	100	1762,1	1854,7	1972,2	2049,5	2151,3	2253,6	1876,4
	55	1754,6	1847,2	1919,7	2042,0	2143,8	2246,1	1868,9
18/90	100	913,8	943,9	967,1	1004,6	1034,9	1065,1	951,8
	17	900,0	930,0	953,2	990,8	1021,0	1051,3	938,0
Valor Médio		1268,0	1329,1	1380,6	1456,0	1521,4	1586,9	1342,0
		Cenários de Variação da Precipitação						
		+ 6%	+ 10%	+ 15%	+ 20%	+ 25%	+ 30%	Cenário 1 (1)
AGUT/NC	Humidade do solo	Recarga versus séries alteradas de precipitação para o Cabrito (%)						
186/91	185	+5,3	+9,9	+13,4	+19,2	+23,9	+28,6	+10,8
	100	+5,4	+10,1	+13,8	+19,6	+24,5	+29,3	+11,0
182/75	181	+6,4	+10,6	+15,7	+22,3	+27,8	+33,2	+12,3
	100	+6,5	+11,8	+15,9	+22,6	+28,1	+33,6	+12,4
105/56	100	+6,9	+12,4	+16,7	+23,8	+29,8	+35,7	+13,6
105/1	100	+7,6	+13,7	+18,4	+26,5	+33,2	+40,0	+15,0
99/83	100	+5,5	+9,9	+13,3	+19,0	+23,5	+28,1	+11,1
97/61	100	+6,7	+12,0	+16,2	+23,1	+28,8	+34,5	+13,2
56/38	100	+7,0	+12,6	+19,8	+24,5	+30,6	+36,9	+13,9
	55	+7,0	+12,7	+17,1	+24,6	+30,8	+37,0	+14,0
18/90	100	+3,4	+6,8	+9,5	+13,7	+17,1	+20,6	+7,7
	17	+3,5	+7,0	+9,6	+14,0	+17,4	+20,9	+7,9
Valor Médio		+5,9	+10,9	+14,9	+21,1	+26,3	+31,5	+11,9

(1) precipitação a +15% na estação húmida e sem tendência de alteração no Verão

Se nestes cenários se comparar a variação da precipitação com a recarga verifica-se que (Quadros XIV e XV):

a) Independentemente do tipo de vegetação ou natureza do solo, a proporção entre a percentagem de subida da recarga e a percentagem de variação da precipitação é sempre mais elevada quando se regista apenas uma subida de precipitação no Inverno e não ocorre qualquer decréscimo nas restantes estações do ano (Cenário 1).

b) Nas áreas de solos com capacidade de infiltração intermédia (a verde) o comportamento da variação da recarga entre zonas de vegetação arbustivo/arbórea e arbustiva/gramíneas é sensivelmente semelhante.

c) Nos solos com elevada capacidade de infiltração e ocupação vegetal de tipo arbóreo (a azul) a taxa de recarga é praticamente sempre a mais elevada, indiciando que o principal factor condicionante da recarga, nestas circunstâncias, é a capacidade de

infiltração. Esta taxa de recarga pode chegar a ser duas vezes superior à taxa de subida da precipitação e este incremento é máximo quando a variação da precipitação é sazonal (Cenário 1).

Quadro XV – Variação da Recarga (valor médio anual) num Mesmo Aquífero Face a Variação das Precipitações (% de Subida)

	Cenários de Variação da Precipitação						Cenário 1 (+7,5%)
	+ 6%	+ 10%	+ 15%	+ 20%	+ 25%	+ 30%	
AGUT/NC	Factor de multiplicação entre o valor de subida da precipitação e o de subida da recarga						
186/91	0.90	1.01	0.92	0.98	0.98	0.98	1.47
182/75	1.08	1.18	1.06	1.13	1.12	1.12	1.65
105/56	1.15	1.24	1.11	1.19	1.19	1.19	1.81
105/1	1.27	1.37	1.23	1.33	1.33	1.33	2.00
99/83	0.92	0.99	0.89	0.95	0.94	0.94	1.48
97/61	1.12	1.20	1.08	1.16	1.15	1.15	1.76
56/38	1.17	1.26	1.32	1.23	1.22	1.23	1.85
18/90	0.57	0.68	0.63	0.69	0.68	0.69	1.03

(1) precipitação a +15% na estação húmida e sem tendência de alteração no Verão

d) Nos solos de alta capacidade de escoamento (assinalados a amarelo) a taxa de subida da recarga é quase sempre inferior à taxa de subida da precipitação, e no geral a subida da recarga é mínima se o coberto vegetal for de gramíneas⁵⁹.

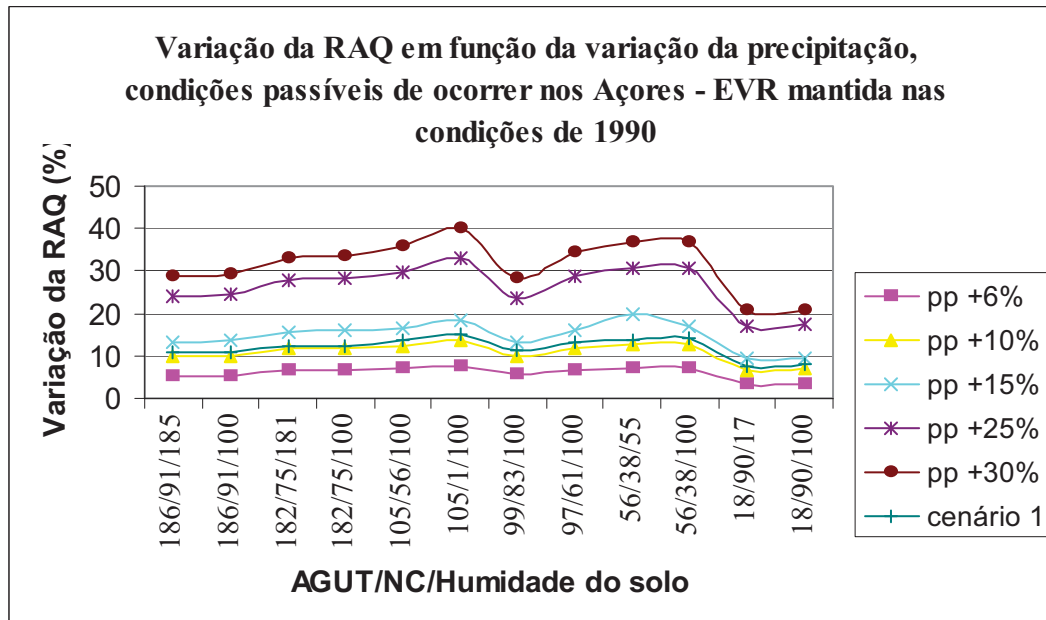


Figura 30 – Variação (em % de variação) da Recarga em Cenários Teóricos Baseados na Possível Variação da Precipitação no Sentido da Subida para os Açores, Aplicados às Séries de Precipitação para o Cabrito (ilha Terceira)

⁵⁹ Considerando os valores mais próximos de NC (91 e 90) parece haver indícios de que a subida da recarga tenderá a ser menor para espessuras radiculares menores (é mínima para AGUT = 18).

É interessante verificar que nos cenários +20%, +25% e +30%, a proporção entre subida da precipitação a subida da recarga se mantém aproximadamente constante (Quadro XV) para cada uma das situações consideradas de coberto vegetal e capacidade de infiltração do solo (pares AGUT/NC), parecendo indiciar a possibilidade de um patamar na tendência evolutiva da recarga a partir do aumento de 20% na precipitação.

Nas Figs. 31 e 32 mostra-se a correlação entre a variação das recargas em função das precipitações, para os cenários de subida das precipitações.

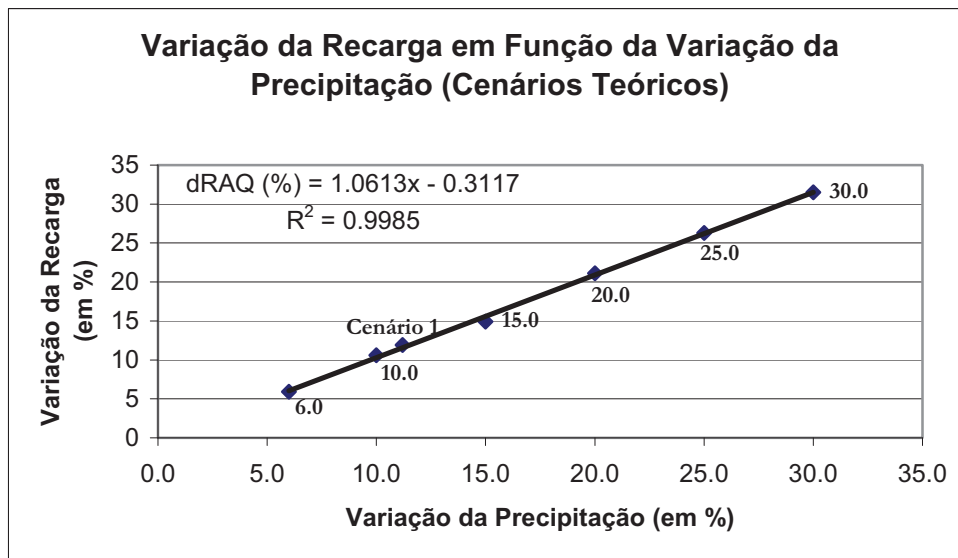


Figura 31 – Correlação da Variação (em %) da Recarga versus Variação da Precipitação (Cenários Teóricos Baseados na Possível Variação da Precipitação no Sentido da Subida, Aplicados às Séries de Precipitação para o Cabrito - ilha Terceira)

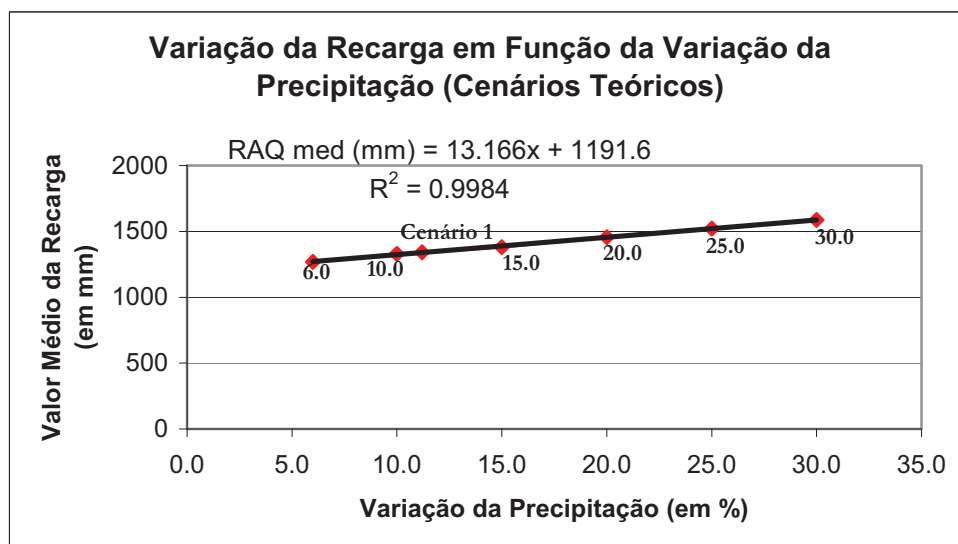


Figura 32 – Correlação do Valor Médio (em mm) da Recarga versus Variação da Precipitação (Cenários Teóricos Baseados na Possível Variação da Precipitação no Sentido da Subida, Aplicados às Séries de Precipitação para o Cabrito - ilha Terceira)

Considerando a totalidade das duas tendências (subida e descida), averiguou-se se os cenários de subida e de descida agora apresentados poderiam ter uma relação linear. Os resultados desta análise apresentam-se nas Figs. 33 e 34.

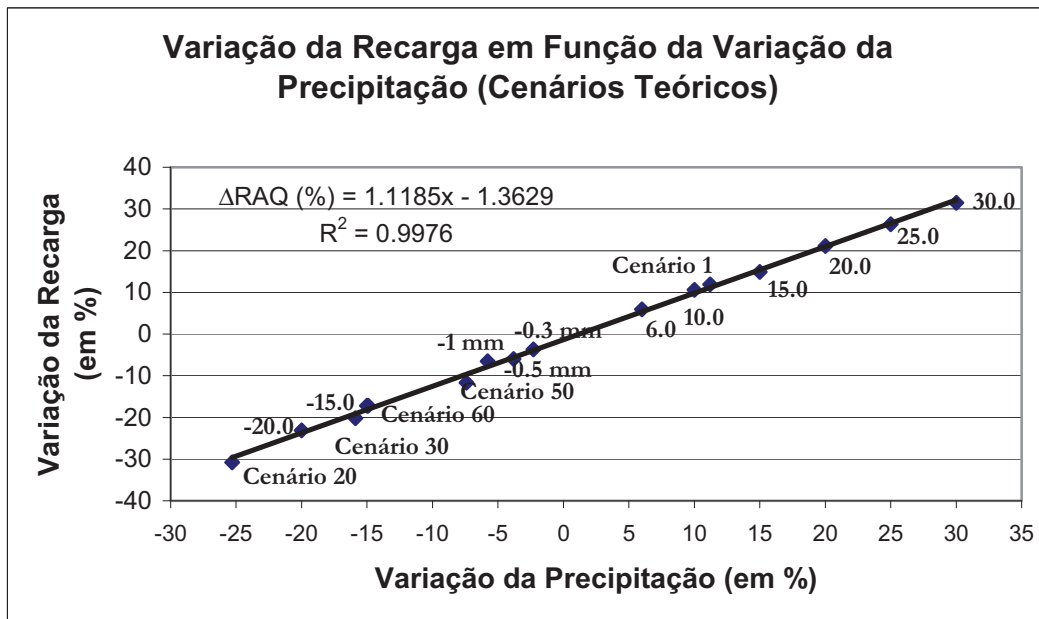


Figura 33 – Correlação da Variação (em %) da Recarga versus Variação da Precipitação (Totalidade dos Cenários Teóricos de Variação da Precipitação, Aplicados às Séries de Precipitação para o Cabrito - ilha Terceira)

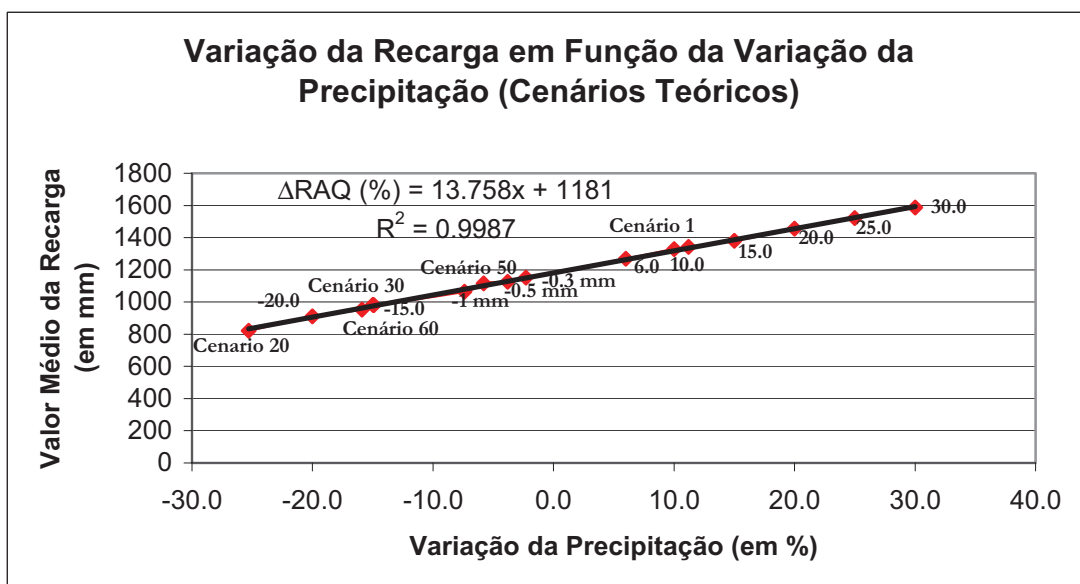


Figura 34 – Correlação do Valor Médio (em mm) da Recarga versus Variação da Precipitação (Totalidade dos Cenários Teóricos de Variação da Precipitação, Aplicados às Séries de Precipitação para o Cabrito - ilha Terceira)

Embora recordando que a recarga não depende apenas da quantidade de precipitação, mas – e já ignorando os aspectos intrínsecos do solo e da vegetação – da

acção conjunta da temperatura e evapotranspiração, o que se pretende aqui é verificar, para condições estritamente teóricas, apesar de baseadas em condições reais de solo e coberto vegetal, o impacto das alterações nos valores da precipitação da ordem de grandeza das apontadas por alguns cenários de alteração climática, sobre a recarga em solos “teóricos”⁶⁰ dos Açores. Assim, com base nos resultados obtidos acima e para os pares de NC/AGUT considerados, verifica-se que para:

- **Cenário de descida de 0,3 mm/dia** – em média regista-se uma descida de cerca de 3,7% da recarga, sendo a redução máxima, da ordem dos 5,8%, nos pares AGUT/NC = 186/91 e a mínima, da ordem dos 2,8%, nos pares AGUT/NC = 56/38.
- **Cenário de descida de 0,5 mm/dia** – a descida média da recarga é de cerca de 6%, sendo os pares AGUT/NC = 186/91 os que registam maiores perdas (9,3%) e os pares 56/38 as perdas menores (4,5%).
- **Cenário de descida de 1 mm/dia** – a descida média da recarga é de cerca de 12%, com as perdas máximas (cerca de 18%) a ocorrerem de novo no par AGUT/NC = 186/91 e as mínimas (cerca de 9%) no par AGUT/NC = 56/38.
- **Cenário de descida de 15%** – a descida média da recarga é da ordem dos 17%, ocorrendo as reduções máximas (cerca de 20%) para o par AGUT/NC = 105/1 e as reduções mínimas (cerca de 12,5%) no par AGUT/NC = 18/90.
- **Cenário de descida de 20%** – a descida média da recarga é da ordem dos 23%, com a maior redução (26,5%) a registar-se para o par AGUT/NC = 105/1 e a mais pequena (17%) para o par AGUT/NC = 18/90.
- **Cenário 20 (descida de 30% na Primavera, 15% no Verão, 60% no Outono e subida de 20% no Inverno)** – a recarga sofre em média um decréscimo de cerca de 31%, sendo os decréscimos maiores (cerca de 34%) registados para o par AGUT/NC = 105/1 e os menores (24%) para o par AGUT/NC = 18/90.
- **Cenário 30 (descida de 30% na Primavera, 15% no Verão, 35% no Outono e subida de 20% no Inverno)** – os valores da recarga decrescem em média cerca de 17%, registando-se os maiores decréscimos (cerca de 19,5%) para o par AGUT/NC = 105/1 e os menores (12%) para o par AGUT/NC = 18/90.
- **Cenário 50 (descida de 30% na Primavera, 15% no Verão, 35% no Outono e subida de 50% no Inverno)** – a recarga sofre uma redução média de 6,5%, sendo a redução maior (cerca de 8%) registada para o par AGUT/NC = 186/91 e a menor (5%) para o para o par AGUT/NC = 18/90.
- **Cenário 60 (descida de 30% na Primavera, 15% no Verão, 60% no Outono e subida de 50% no Inverno)** – a recarga sofre uma redução média da ordem dos 20%, sendo as maiores reduções (23%) observadas para o par AGUT/NC = 186/91 e a menor (16,5%) para o par AGUT/NC = 18/90.
- **Cenário de subida de precipitação de 6%** – o valor médio de subida da recarga é de cerca de 6%, verificando-se as menores subidas (3,5%) para os pares AGUT/NC = 18/90 e as maiores (7 a 7,6%) para respectivamente os pares AGUT/NC = 56/38 105/1.

⁶⁰ Note-se contudo que estes solos “teóricos”, ocorrem na verdade na região do Cabrito, e, dado o tipo de vegetação e rochas da ilha, serão comuns em toda a ilha Terceira.

- ***Cenário de subida de precipitação de 10%*** – o valor médio de subida da recarga ronda os 11%, sendo as maiores subidas (12,4 a 13%) respectivamente para os pares AGUT/NC = 105/56 e 105/1 e as menores da ordem de 7% para o par AGUT/NC = 18/90.
- ***Cenário de subida de precipitação de 15%*** – o valor médio de subida da recarga ronda os 15%, sendo as maiores subidas registadas para os pares AGUT/NC = 105/56 (18,4%) e AGUT/NC = 56/38 (17,1 a 19,8%).
- ***Cenário de subida de precipitação de 20%*** – o valor médio de subida da recarga é de cerca de 21%, com os valores máximos de subida entre os 24,5 e os 26% para respectivamente os pares AGUT/NC = 56/38 e 105/1, ao passo que as menores subidas (cerca de 14%) se registam de novo para o par AGUT/NC = 18/90.
- ***Cenário de subida de precipitação de 25%*** – o valor médio de subida da recarga é de 26%, registando-se as maiores subidas para os pares AGUT/NC = 56/38 e 105/1, com respectivamente 31 e 33%; as menores subidas, da ordem dos 17%, registam-se para o par AGUT/NC = 18/90.
- ***Cenário de subida de precipitação de 30%*** – o valor médio de subida de recarga é de cerca de 31%, com os valores de maior subida (37 a 40%) a serem registados respectivamente pelos pares AGUT/NC = 56/38 e 105/1; a menor subida (cerca de 21%) regista-se para o par AGUT/NC = 18/90.
- ***Cenário 1 (subida de 15% na estação húmida e de 0% no Verão)*** – o valor médio de subida da recarga é de cerca de 12%, registando-se as maiores subidas (15%) para o par AGUT/NC = 105/1 e a as menores subidas (cerca dos 8%) para o par AGUT/NC = 18/90.

Verifica-se deste modo que, se for aplicada uma modificação linear ao longo de toda a extensão das séries de precipitação, a recarga seguirá de muito perto o incremento (ou decréscimo) linear aplicado à precipitação. Porém, quando a variação é diferente para os vários períodos do ano, a subida (ou decréscimo) de recarga para a globalidade do ano pode afastar-se de modo significativo do valor anual médio de alteração do valor de precipitação e este afastamento é tanto maior quanto maior for a variação gerada nos valores da precipitação; por exemplo os Cenários 20 e 60 apresentam uma redução da média anual da precipitação de, respectivamente, cerca 25% e 16%, e os valores obtidos de redução de recarga média são cerca, respectivamente, de 31% e 20%. Isto indicia uma extrema importância das diferentes alterações da precipitação em períodos distintos do ano hidrológico no controlo da recarga.

Embora da observação das figuras ressalte uma relação de linearidade directamente proporcional entre a variação da recarga e a variação da precipitação, sublinhe-se que se nestes cenários, forçosamente simplificados, a um acréscimo de precipitação média corresponde um acréscimo de recarga, no mundo real tal não ocorre obrigatoriamente deste modo. A disponibilidade para a recarga depende não apenas da quantidade de água mas também da intensidade com que é fornecida ao meio e, como já se discutiu atrás, com os conhecimentos actuais não é possível determinar quantitativamente as tendências de evolução dos eventos individuais de chuva. Deste

modo a análise realizada é muito simplista, dado não poder entrar em linha de conta com as alterações na intensidade dos fenómenos de chuva, e arrisca-se assim a não reflectir correctamente as condições reais de recarga em situação de climas alterados.

Como as condições AGUT/NC usadas foram as da caldeira do Cabrito, dado ser a área melhor conhecida em termos de ocupação vegetal e tipos de solo, e sabendo-se que é uma área de intensa infiltração, é compreensível que exista uma relação quase proporcional entre o aumento ou diminuição da precipitação e o da recarga. Contudo se se olhar para os resultados das áreas menos propícias à infiltração (valores de NC de 90) verifica-se que estas tendem a sofrer a maior redução de recarga, sempre claramente superior à redução da precipitação; por vezes estas reduções chegam a atingir 140 a 150% face à variação da precipitação (ex.: Cenário 60 tem, face aos valores actuais, uma redução média anual de precipitação da ordem dos 16% e a redução máxima registada de recarga é de 23% ou seja, cerca de 144% destes 16%). Em cenários de subida da precipitação estas mesmas áreas sofrem em regra um menor incremento da recarga face à percentagem de subida da chuva. O efeito de redução da recarga é especialmente aumentado quando a vegetação existente tem uma grande profundidade das raízes e os cenários são de redução da precipitação, o que aponta para o importante papel regulador da vegetação nestes processos.

Uma análise do comportamento dos pares NC/AGUT, está representada nas Figs. 35 e 36, para uma capacidade de campo inicial = 100 mm. Embora, como vimos atrás, os comportamentos da recarga sejam distintos conforme a variação da precipitação seja constante ao longo do ano ou tenha variações sazonais distintas, as rectas de regressão das Figs. 35 e 36 podem ser utilizadas para os respectivos pares de solo/coberto vegetal (NC/AGUT), para previsões muito simplificadas de alteração da recarga em função da alteração da precipitação.

Em termos gerais verifica-se que (Figs. 35 e 36):

- **Subida de precipitação:**

- **Par 105/1** – é o que apresenta o mais elevado incremento da recarga face à subida da precipitação.
- **Par 18/90** – é o que apresenta a menor subida da recarga em função da subida da precipitação, sugerindo, como é de prever pelo valor de NC, um aumento do escoamento superficial.

- **Descida de precipitação:**

- **Par 105/1** – é o que apresenta tendencialmente o decréscimo mais acentuado da recarga face à redução da precipitação.
- **Par 18/90** – é o que apresenta tendencialmente a menor redução da recarga face à redução da precipitação, talvez por apresentar à partida condições mais favoráveis ao escoamento superficial do que à recarga.

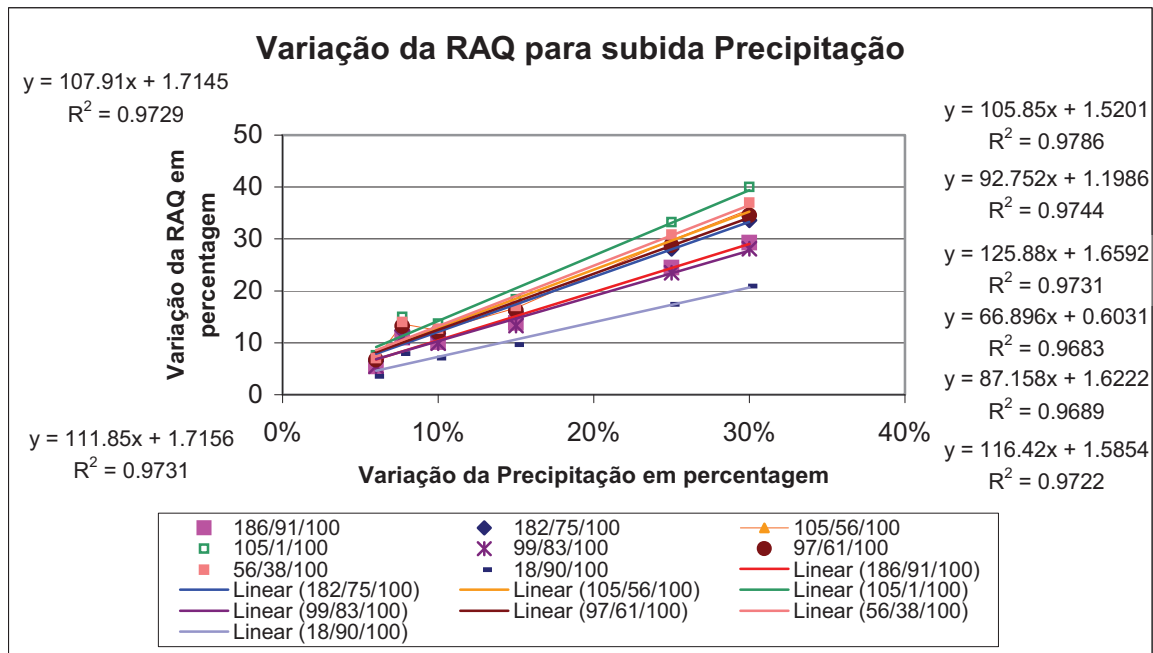


Figura 35 – Variação da Recarga por Tipo de Solo/Vegetação para Cenários de Subida da Precipitação (Aplicados às Séries de Precipitação para o Cabrito - ilha Terceira)

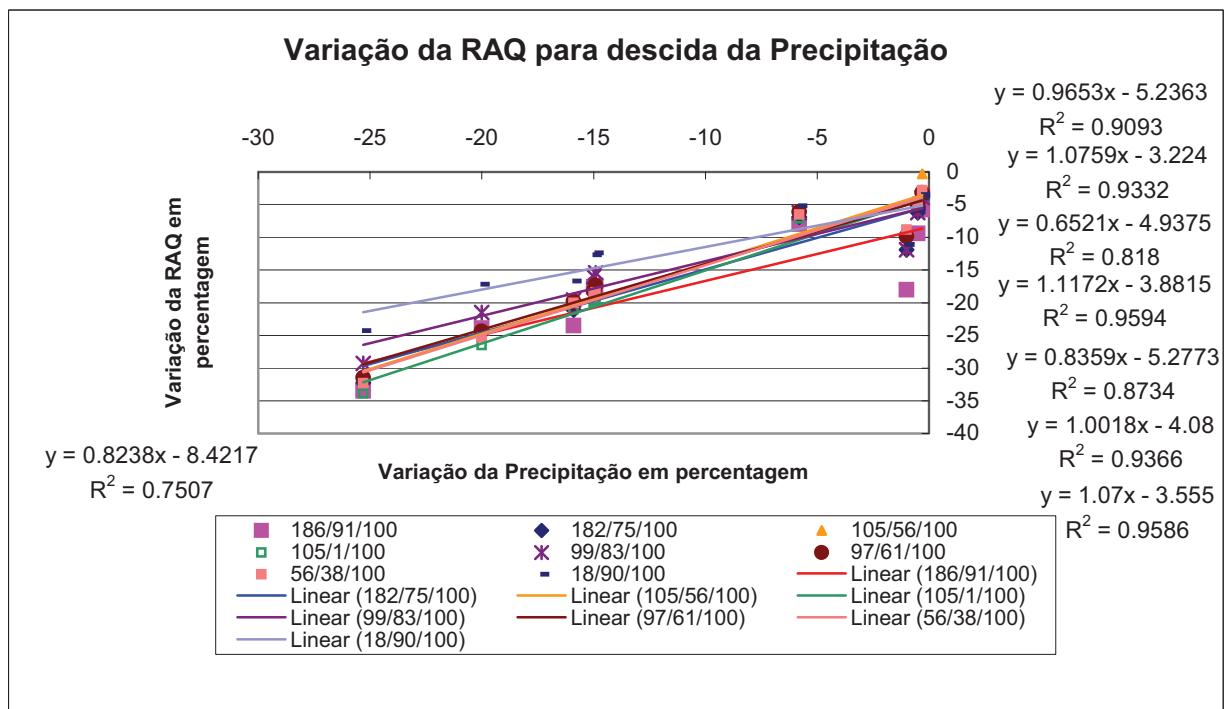


Figura 36 – Variação da Recarga por Tipo de Solo/Vegetação para Cenários de Descida da Precipitação (Aplicados às Séries de Precipitação para o Cabrito - ilha Terceira)

O comportamento do par AGUT/NC = 18/90 pode indiciar, entre outros aspectos directamente relacionados com a vegetação, e que não serão analisados aqui, que como os terrenos de escoamento superficial elevado tenham à partida já uma reduzida taxa de recarga, donde, em condições de redução da disponibilidade de água para a recarga, por pouca apetência para a receber, pouco já possam perder; nos casos em que haja maior disponibilidade de água, esta será, por via das próprias características do terreno, canalizada para o escoamento superficial⁶¹ e portanto o incremento da recarga também tenderá a ser mínimo.

Deve-se mais uma vez sublinhar que os cenários analisados são apenas teóricos dada a incerteza associada aos resultados dos modelos climáticos e ao desconhecimento de aspectos de pormenor da evolução da precipitação como sejam as frequências e intensidades médias de cada tipo de evento de chuva. Assim, as conclusões acima são apenas indicativas das evoluções possíveis em diferentes condições da precipitação e do meio aquífero, sendo necessário conhecimento mais preciso dos aspectos de pormenor das alterações climáticas para os Açores e das reacções dos diferentes tipos de solo/coberto vegetal a essas alterações.

5.1.1.3. DETERMINAÇÃO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL NOS AÇORES PARA DIFERENTES CENÁRIOS ADMITIDOS DE ALTERAÇÃO DOS REGIMES DE PRECIPITAÇÃO

Relativamente ao escoamento superficial e para os mesmos cenários de precipitação atrás considerados, verifica-se que no caso da redução da precipitação este escoamento sofre uma redução, enquanto que no caso da subida da precipitação o escoamento sobe. Em ambas as situações o escoamento pode sofrer uma variação bastante significativa (Quadro XVI e Fig. 37). Se nestes cenários se comparar a variação da precipitação com a do escoamento, verifica-se que (Quadro XVII) a redução do escoamento:

a) Nas áreas de vegetação com menor dimensão radicular (ex.: pastos) e solos com mediana a alta a capacidade de infiltração a variação do escoamento é máxima. Vide valores assinalados a amarelo.

b) Nos solos com elevada capacidade de infiltração e ocupação vegetal de tipo arbóreo/arbustivo toda a precipitação é absorvida, mantendo-se condições de não escoamento.

c) Para solos com tendência para gerar significativo escoamento superficial, a capacidade de infiltração parecer ser a principal responsável pela modificação dos valores de escoamento dado que solos de idênticas capacidades de infiltração (ex.: NC = 90 ou 91), quer para cobertos arbóreos (a verde) quer para gramíneas (a rosa), mostram valores muito próximos, como se a redução de precipitação restringisse o efeito do controle da vegetação sobre o escoamento.

⁶¹ O que pode originar riscos acrescidos de erosão.

Quadro XVI – Variação do Escoamento Superficial (valor médio anual) num Mesmo Aquífero Face a Redução das Precipitações

	Cenários de Variação da Precipitação								
	- 0,3 mm/d	- 0,5 mm/d	- 1 mm/d	- 15% anual	- 20% anual	Cenário 30 (1)	Cenário 20 (2)	Cenário 50 (3)	Cenário 60 (4)
AGUT/NC	Escoamento superficial versus séries alteradas de precipitação para o Cabrito (mm/ano)								
186/91	944,4	936,4	914	738,8	669,3	742,5	610,3	885,5	756,6
182/75	349,7	347,3	340,8	247,4	215,6	242,8	189	316,2	262,8
105/56	98,5	97,9	96,5	61,00	50,3	53,9	38,4	79,7	64,2
105/1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
99/83	567,1	562,8	550,9	420,9	373,7	420,6	336,2	524,5	441,5
97/61	142,3	141,5	139,3	91,8	77	84,6	62,4	120	97,7
56/38	15,2	15,1	14,9	7,1	5,2	4	2,4	8,7	7,1
18/90	882,8	875,4	854,8	685,7	619,5	689	564,2	826,5	704,7
Valor Médio	375,0	372,1	363,9	281,6	251,3	279,7	225,4	345,1	291,8
	Cenários de Variação da Precipitação								
	- 0,3 mm/d	- 0,5 mm/d	- 1 mm/d	- 15% anual	- 20% anual	Cenário 30 (1)	Cenário 20 (2)	Cenário 50 (3)	Cenário 60 (4)
AGUT/NC	Escoamento superficial versus séries alteradas de precipitação para o Cabrito (%)								
186/91	-1,3	-2,1	-4,4	-22,8	-30,0	-22,4	-36,2	-7,4	-20,9
182/75	-1,0	-1,7	-3,5	-30,0	-39,0	-31,3	-46,5	-10,5	-25,6
105/56	-0,9	-1,5	-2,9	-38,6	-49,4	-45,8	-61,4	-19,8	-35,4
105/1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
99/83	-1,1	-1,9	-3,9	-26,6	-34,8	-26,7	-41,4	-8,5	-23,0
97/61	-0,9	-1,5	-3,0	-36,1	-46,4	-41,1	-56,5	-16,4	-32,0
	Cenários de Variação da Precipitação								
	- 0,3 mm/d	- 0,5 mm/d	- 1 mm/d	- 15% anual	- 20% anual	Cenário 30 (1)	Cenário 20 (2)	Cenário 50 (3)	Cenário 60 (4)
56/38	-1,3	-1,9	-3,2	-53,9	-66,2	-74,0	-84,4	-43,5	-53,9
18/90	-1,2	-2,1	-4,4	-23,3	-30,7	-22,9	-36,9	-7,5	-21,2
Valor Médio	-0,96	-1,6	-3,2	-28,9	-37,1	-33,0	-45,4	-14,2	-26,5

(1) precipitação a -30% Primavera, -15% no Verão, -35% no Outono, +20% no Inverno = -14,9% anual

(2) precipitação a -30% Primavera, -15% no Verão, -60% no Outono, +20% no Inverno = -25,3% anual

(3) precipitação a -30% Primavera, -15% no Verão, -35% no Outono, +50% no Inverno = - 5,8% anual

(4) precipitação a -30% Primavera, -15% no Verão, -60% no Outono, +50% no Inverno = - 15,9% anual

Nota: -15% anual e -20% anual significa que se afectou a série de uma redução de cerca de 15 e 20% respectivamente por dia, o que deu 15 e 20% respectivamente menos precipitação anual

Quadro XVII – Variação do Escoamento Superficial (valor médio anual) num Mesmo Aquífero Face a Variação das Precipitações (% de Descida)

	Cenários de Variação da Precipitação					
	- 15% anual	- 20% anual	Cenário 30 (-14,9%)	Cenário 20 (-25,3%)	Cenário 50 (-5,8%)	Cenário 60 (-15,9%)
AGUT/NC	Factor de multiplicação entre o valor de descida da precipitação e o de descida do escoamento superficial					
186/91	1.52	1.50	1.50	1.43	1.28	1.31
182/75	2.00	1.95	2.10	1.84	1.81	1.61
105/56	2.57	2.47	3.07	2.43	3.41	2.23
99/83	1.77	1.74	1.79	1.64	1.47	1.45
97/61	2.41	2.32	2.76	2.23	2.83	2.01
56/38	3.59	3.31	4.97	3.34	7.50	3.39
18/90	1.55	1.54	1.54	1.46	1.29	1.33

Nota: -15% anual e -20% anual significa que se afectou a série de uma redução de cerca de 15 e 20% respectivamente por dia, o que deu 15 e 20% respectivamente menos precipitação anual

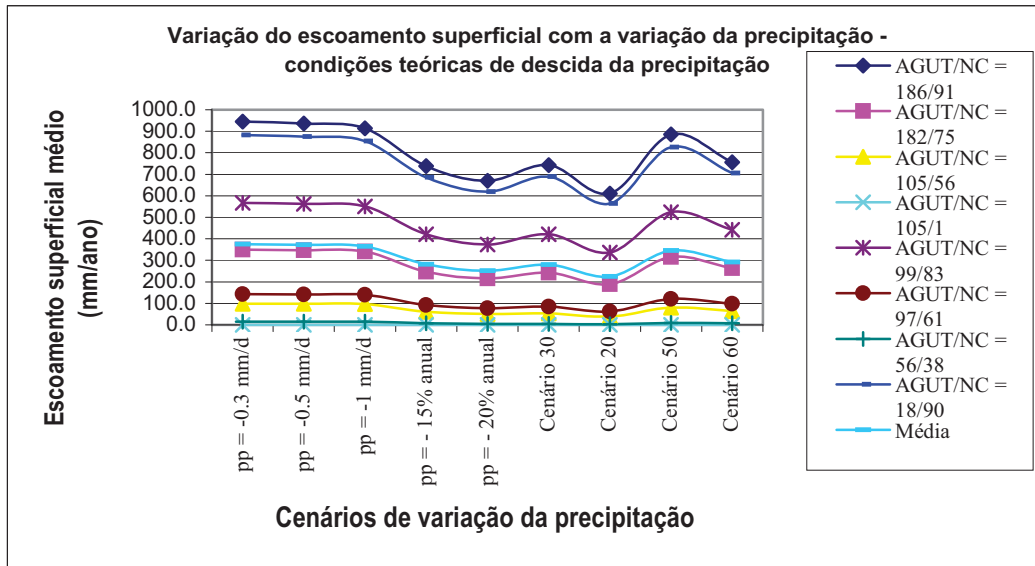


Figura 37 – Variação (em mm) do Escoamento Superficial em Cenários Teóricos Baseados na Possível Variação da Precipitação no Sentido da Descida, Aplicados às Séries de Precipitação para o Cabrito (ilha Terceira)

Nas Figs. 38 e 39 apresenta-se a correlação entre a variação do escoamento superficial em função das precipitações, para percentagens e valores de mm/ano respectivamente, no caso de cenários de descida das precipitações.

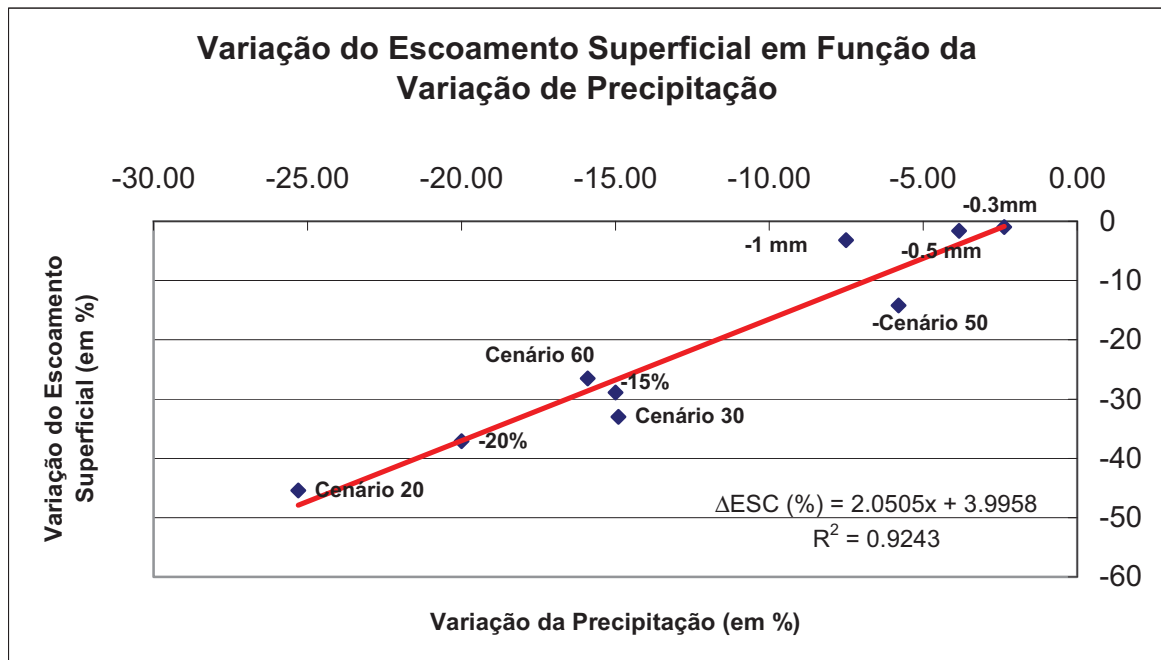


Figura 38 – Correlação da Variação (em %) do Escoamento Superficial versus Variação da Precipitação (Cenários Teóricos de Precipitação no Sentido da Descida, Aplicados às Séries de Precipitação para o Cabrito - ilha Terceira)

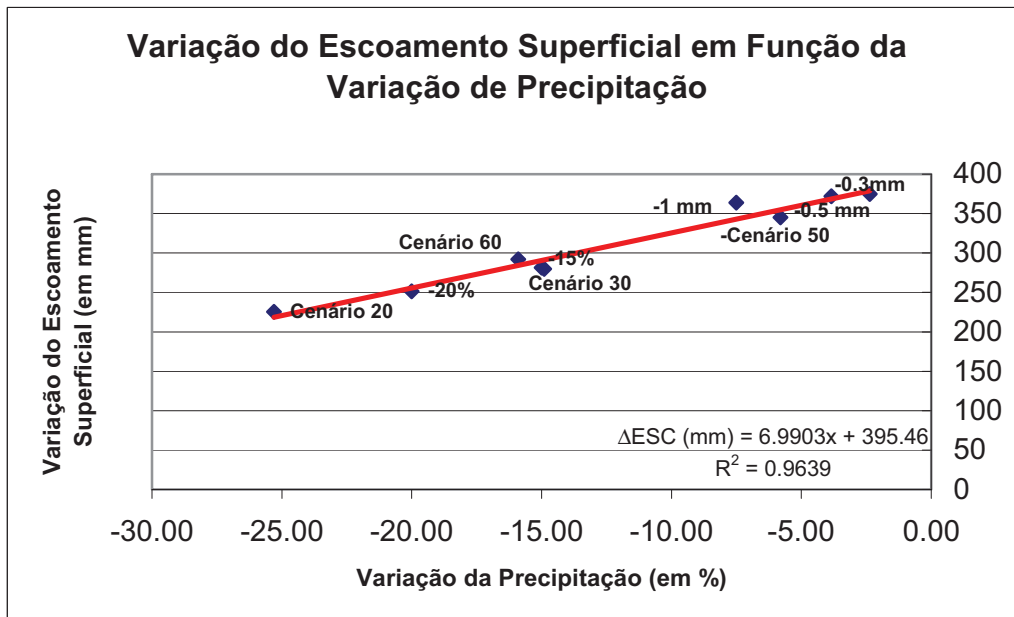


Figura 39 – Correlação do Valor Médio (em mm) do Escoamento Superficial versus Variação da Precipitação (Cenários Teóricos de Precipitação no Sentido da Descida, Aplicados às Séries de Precipitação para o Cabrito - ilha Terceira)

Como se pode ver, a variação do escoamento não apresenta um padrão de variação tão linear com a precipitação como a recarga. Os cenários com uma variação constante da precipitação ao longo do ano (ex.: -1 mm/dia) parecem definir uma linha de tendência distinta da dos cenários com variações sazonais; estes últimos parecem indicar reduções de escoamento mais nítidas para reduções de precipitação no Outono, em comparação com séries cujos valores de alteração constante da precipitação ao longo de todo o ano são similares (ex.: Cenário 50 e -0,5 mm/dia).

Para os cenários de redução constante da precipitação a tendência do escoamento é a apresentada na Fig. 40, e na Fig. 41 a tendência do escoamento para os cenários de alteração sazonal variável da precipitação.

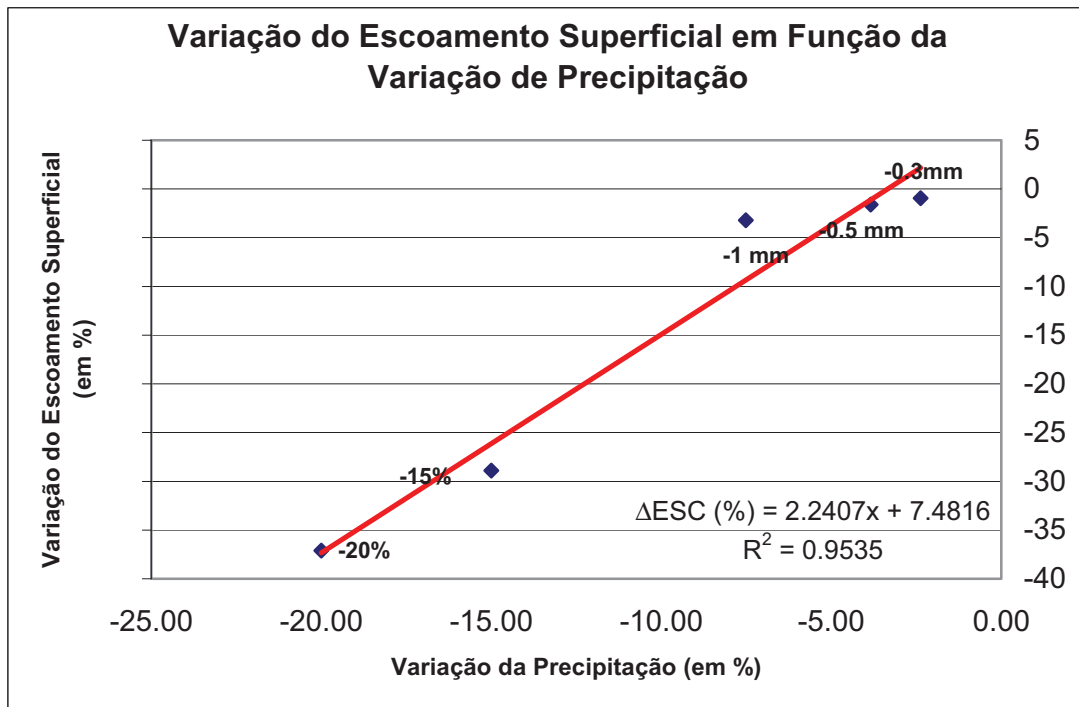


Figura 40 – Correlação do Valor Médio (em %) do Escoamento Superficial versus Variação da Precipitação (Cenários Teóricos de Variação Constante da Precipitação no Sentido da Descida, Aplicados às Séries de Precipitação para o Cabrito - ilha Terceira)

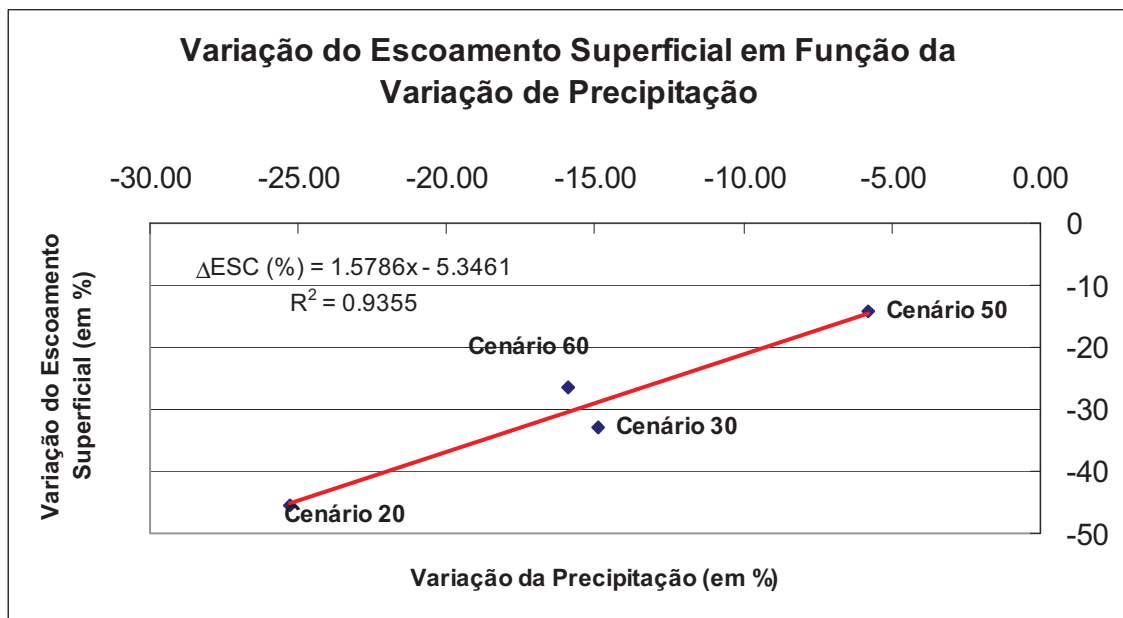


Figura 41 – Correlação do Valor Médio (em %) do Escoamento Superficial versus Variação da Precipitação (Cenários Teóricos de Variação Sazonal da Precipitação no Sentido da Descida, Aplicados às Séries de Precipitação para o Cabrito - ilha Terceira)

Para os cenários de subida das precipitações tem-se (Quadro XVIII, Fig. 42):

Quadro XVIII – Variação do Escoamento Superficial (valor médio anual) num Mesmo Aquífero Face a Subida das Precipitações

	Cenários de Variação da Precipitação						
	+ 6%	+ 10%	+ 15%	+ 20%	+ 25%	+ 30%	Cenário 1 (1)
AGUT/NC	Escoamento superficial versus séries alteradas de precipitação para o Cabrito (mm/ano)						
186/91	1047,1	1116,1	1170,4	1264,7	1344,5	1425,1	1130
182/75	399,8	436,1	465,1	516,4	560,7	606,3	443,7
105/56	117,5	132,1	144	165,6	184,7	204,8	135,4
105/1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
99/83	638,9	689,2	729,1	799,1	859	920	699,7
97/61	167,6	186,6	202	229,9	254,3	279,8	190,8
56/38	19,9	23,8	27	33,2	38,9	45	25,1
18/90	980,8	1047,2	1099,4	1190,2	1267,2	1345	1060,7
Valor Médio	421,5	453,9	479,6	576,2	563,7	603,3	460,7
	Cenários de Variação da Precipitação						
	+ 6%	+ 10%	+ 15%	+ 20%	+ 25%	+ 30%	Cenário 1 (1)
AGUT/NC	Escoamento superficial versus séries alteradas de precipitação para o Cabrito (%)						
186/91	9,5	16,7	22,4	32,2	40,6	49,0	18,2
182/75	13,2	23,5	31,7	46,2	58,7	71,7	25,6
105/56	18,2	32,9	44,9	66,6	85,8	106,0	36,2
105/1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
99/83	11,4	20,2	27,1	39,3	49,8	60,4	22,0
97/61	16,7	29,9	40,7	60,1	77,1	94,8	32,9
56/38	29,2	54,5	75,3	115,6	152,6	192,2	63,0
18/90	9,7	17,2	23,0	33,2	41,8	50,5	18,7
Valor Médio	13,5	24,4	33,1	49,2	63,3	78,1	27,07

(1) precipitação a +15% na estação húmida e sem tendência de alteração no Verão

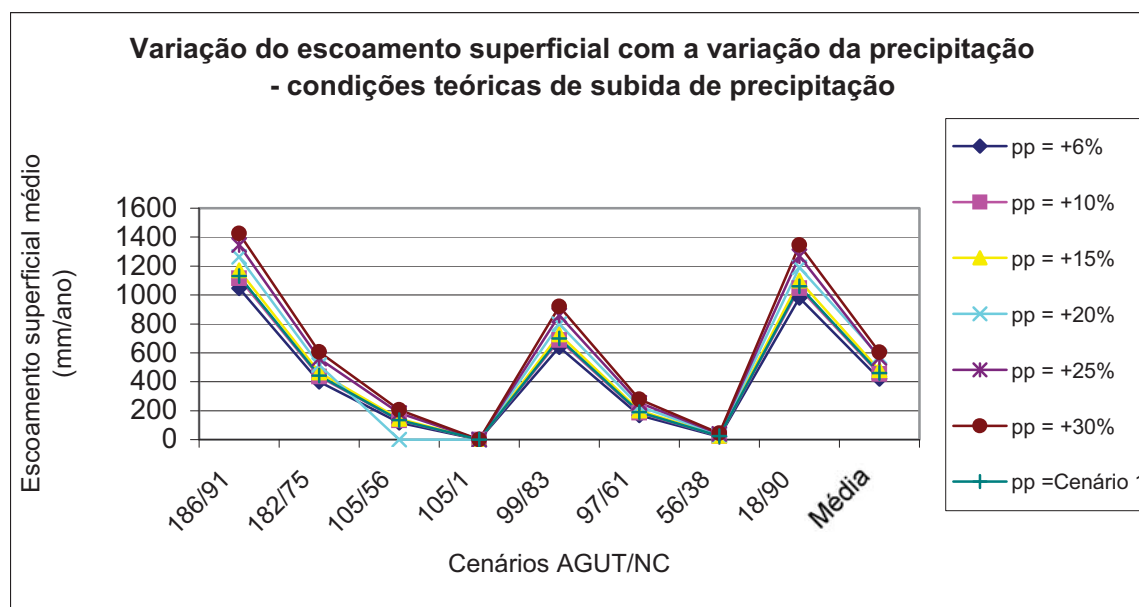


Figura 42 – Variação (em mm/ano) do Escoamento Superficial em Cenários Teóricos Baseados na Possível Variação da Precipitação para os Açores, Aplicados às Séries de Precipitação para o Cabrito (ilha Terceira)

Impactos das Alterações Climáticas: Mudanças nos Regimes de Precipitação e seus Impactos sobre a Recarga de Aquíferos

Se nestes cenários se comparar a variação da precipitação com a do escoamento, verifica-se que (Quadros XVIII e XIX):

a) No geral o escoamento superficial aumenta, havendo situações de subidas muito significativas (par AGUT/NC = 56/38) sendo as áreas de vegetação com mediana dimensão radicular (ex.: pastos) as mais afectadas, em especial se em solos com mediana capacidade de infiltração. Vide valores assinalados a amarelo e também par AGUT/NC = 105/56.

b) Os solos com uma máxima capacidade de infiltração (NC = 1) e uma ocupação vegetal de tipo arbustivo/arbóreo podem absorver toda a precipitação pressuposta, mantendo as condições de não escoamento.

c) As zonas com capacidade para produzir escoamento intermédio são as que registam maiores incrementos de escoamento superficial. Vide valores assinalados a amarelo.

d) As zonas com capacidade para produzir escoamento elevado (NC elevado) apresentam as menores variações, talvez por estarem já à partida muito perto do escoamento máximo possível. Vide valores a verde e vermelho.

e) O factor dominante no controlo do escoamento, nestes cenários de alteração da precipitação, parece ser a capacidade de infiltração do terreno.

f) Contudo a vegetação mostra também algum um controlo sobre o escoamento, verificando-se que para condições idênticas de NC a cobertura arbórea consegue reter um pouco mais de escoamento (a verde) do que a cobertura de possíveis gramíneas (valores assinalados a rosa); no entanto este controlo é moderado para terrenos com elevada capacidade de escoamento (NC = 90 e 91). Será importante em estudos futuros avaliar da resposta dos diferentes tipos de vegetação considerando para cada um destes o mesmo tipo de solo.

Quadro XIX – Variação do Escoamento Superficial (valor médio anual) num Mesmo Aquífero Face a Variação das Precipitações (% de Subida)

	Cenários de Variação da Precipitação						
	+ 6%	+ 10%	+ 15%	+ 20%	+ 25%	+ 30%	Cenário 1 (1)
AGUT/NC	Factor de multiplicação entre o valor de subida da precipitação e o de subida do escoamento superficial						
186/91	1.58	1.67	1.49	1.61	1.62	1.63	2.43
182/75	2.20	2.35	2.11	2.31	2.35	2.39	3.41
105/56	3.03	3.29	2.99	3.33	3.43	3.53	4.83
99/83	1.90	2.02	1.81	1.97	1.99	2.01	2.93
97/61	2.78	2.99	2.71	3.01	3.08	3.16	4.39
56/38	4.87	5.45	5.02	5.78	6.10	6.41	8.40
18/90	1.62	1.72	1.53	1.66	1.67	1.68	2.49

Nas Figs. 43 e 44 apresenta-se a correlação entre a variação do escoamento superficial em função das precipitações, para percentagens e valores de mm/ano respectivamente, no caso de cenários de subida das precipitações.

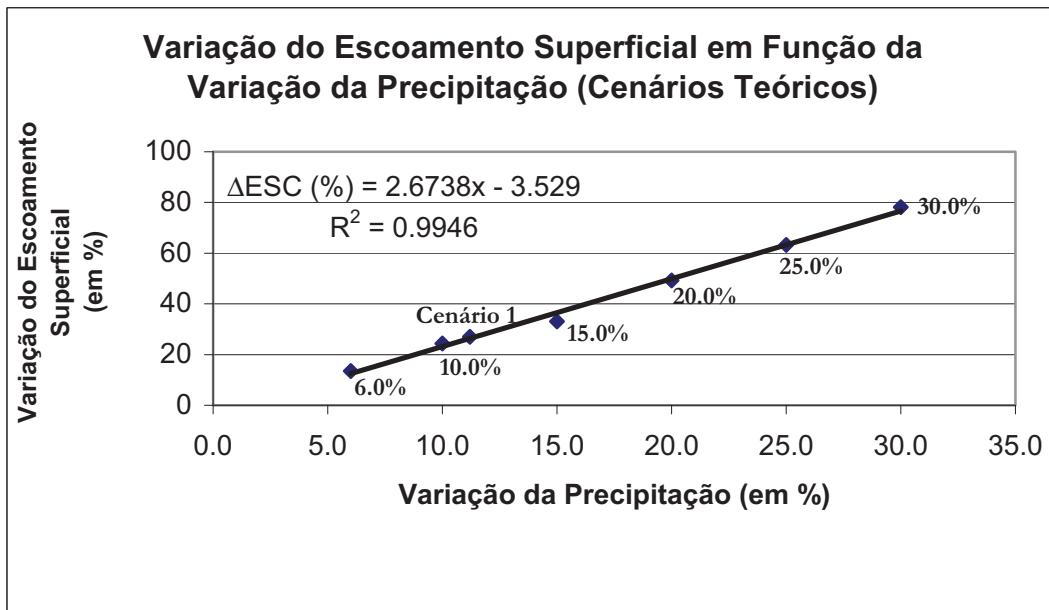


Figura 43 – Correlação da Variação (em %) do Escoamento Superficial versus Variação da Precipitação (Cenários Teóricos Baseados na Possível Variação da Precipitação no Sentido da Subida, Aplicados às Séries de Precipitação para o Cabrito - ilha Terceira)

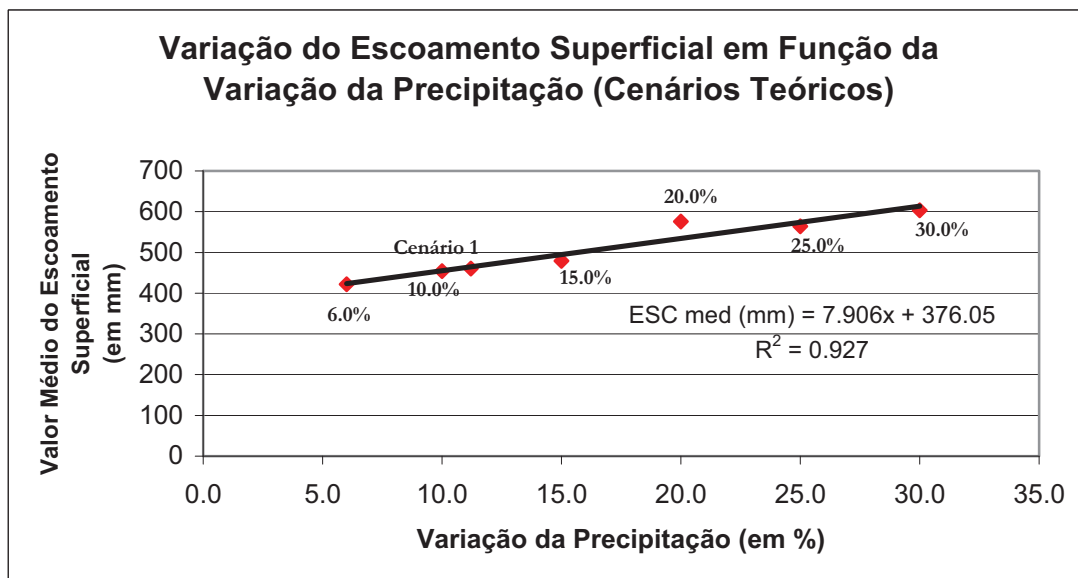


Figura 44 – Correlação do Valor Médio (em mm) do Escoamento Superficial versus Variação da Precipitação (Cenários Teóricos Baseados na Possível Variação da Precipitação no Sentido da Subida, Aplicados às Séries de Precipitação para o Cabrito - ilha Terceira)

Considerando a totalidade das duas tendências (subida e descida), e procurando ver se seria possível definir um comportamento similar aos verificados para a variação das Recargas, averiguou-se se o comportamento do escoamento superficial poderia ter uma relação linear. Os resultados apresentam-se nas Figs. 45 e 46.

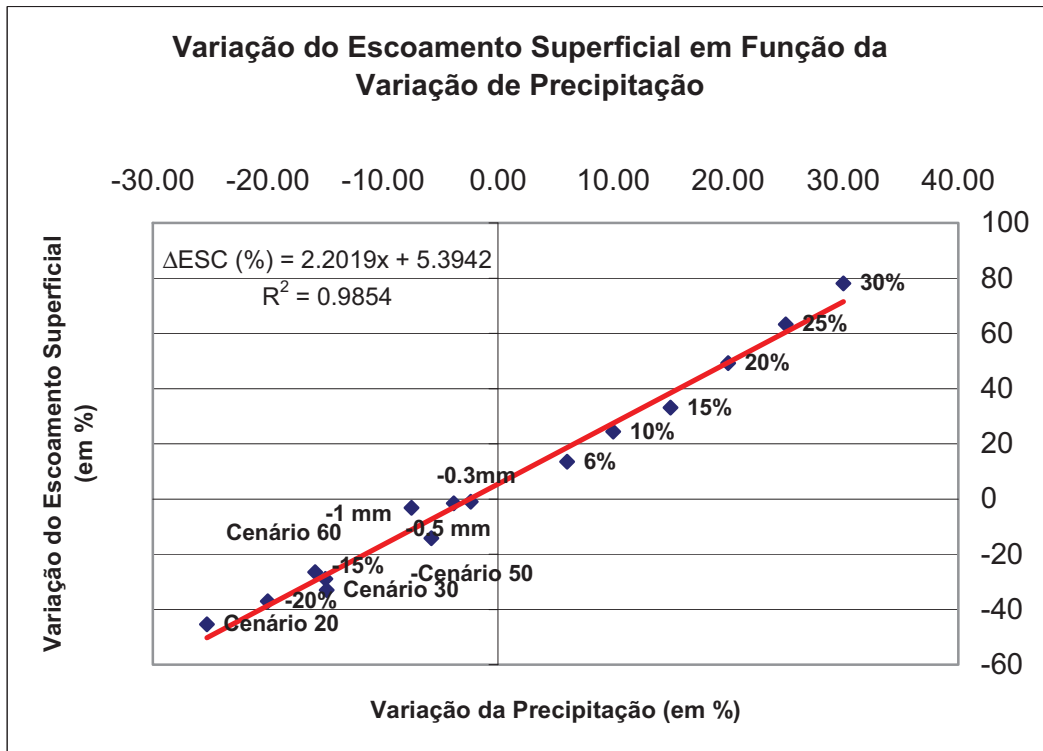


Figura 45 – Correlação da Variação (em %) do Escoamento Superficial versus Variação da Precipitação (Totalidade dos Cenários Teóricos de Variação da Precipitação, Aplicados às Séries de Precipitação para o Cabrito - ilha Terceira)

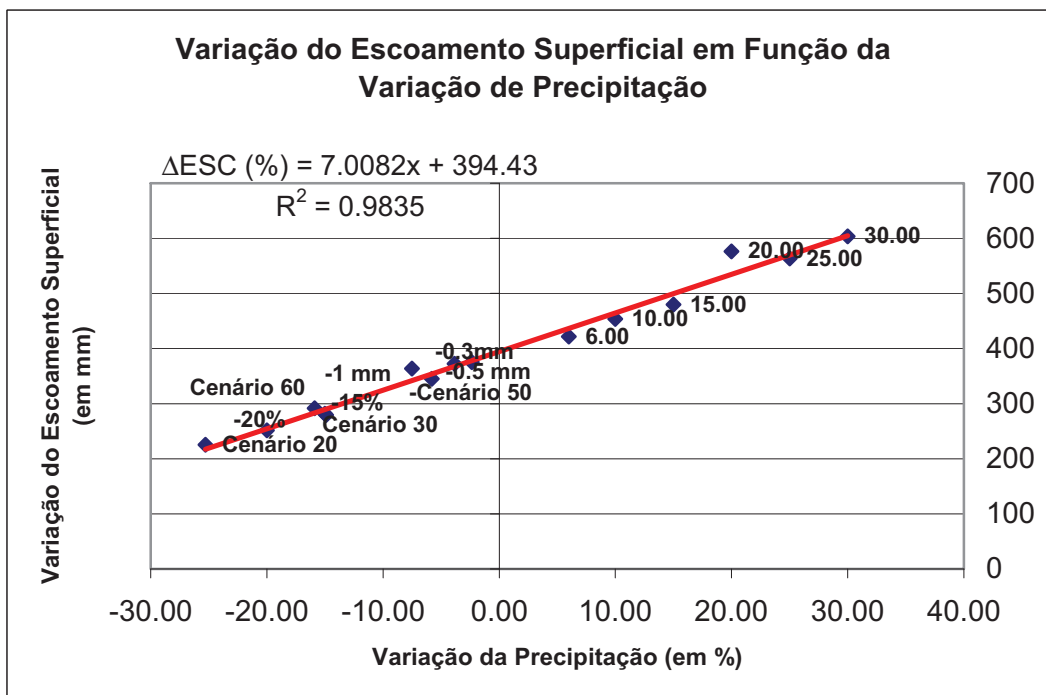


Figura 46 – Correlação do Valor Médio (em mm) do Escoamento Superficial versus Variação da Precipitação (Totalidade dos Cenários de Variação da Precipitação, Aplicados às Séries de Precipitação para o Cabrito - ilha Terceira)

Dos resultados apresentados verifica-se que a redução da precipitação leva a uma redução do escoamento superficial, podendo esta redução atingir em média valores até 2 a 3 vezes superiores à taxa de redução da precipitação⁶² (Quadro XVII). A situação mais crítica, em termos de redução do escoamento, face à redução da precipitação, é a de coberto vegetal herbáceo em solos de média a alta infiltração (par AGUT/NC = 56/38), onde se pode chegar, nos casos mais extremos de redução da precipitação (Cenário 20), aos 84% de redução do escoamento superficial (em valores absolutos face à situação de escoamento superficial referência, sendo o equivalente a 3,34 vezes a redução da precipitação). A subida da precipitação origina um aumento do escoamento superficial que corresponde em média a cerca de 2 a 2,5 vezes superiores à taxa de variação da precipitação, podendo alcançar um máximo de 8,4% (Quadro XIX). Mais uma vez a situação representada pelo par AGUT/NC = 56/38 é a que regista maior variação, podendo chegar a incrementos de escoamento superficial de quase 200%⁶³ face à situação de referência (década de 1990), no caso do cenário mais catastrófico (Cenário +30%).

5.2. Efeitos das Variações das Temperaturas Versus Evapotranspirações sobre a Recarga de Aquíferos

Neste capítulo é analisado o impacto das alterações de temperatura sobre as recargas, seguindo a mesma metodologia base utilizada para a análise do efeito da variação da precipitação (sub-capítulo 5.1.), aplicando-se os mesmos cenários de precipitação utilizados no sub-capítulo 5.1. Para o estudo dos impactos da alteração da evapotranspiração sobre a recarga consideraram-se cenários de variação da temperatura, conformes às projecções dos modelos climáticos, e estes cenários de temperaturas modificadas foram usados para calcular a alteração da evapotranspiração. Estas novas evapotranspirações formaram os cenários de evapotranspiração, cujos valores foram posteriormente introduzidos como dados de entrada no modelo de balanço hídrico BALSEQ, de modo a calcular as recargas sob estas novas condições.

Para uma correcta avaliação destes impactos deveria conhecer-se as tendências evolutivas do coberto vegetal às novas condições climáticas. Com efeito, uma alteração térmica tenderá a criar modificações na vegetação, e no impacto desta sobre o ciclo da água, nomeadamente sobre a infiltração, evapotranspiração, adsorção de água pelas raízes, escoamento superficial e, por conseguinte, a recarga. Porém, no estado actual dos conhecimentos, não é possível conhecer de que forma este coberto poderá mudar e portanto não se consegue projectar a mudança na parcela da evapotranspiração devida às plantas. Também, pelos mesmos motivos, não se pode modificar de modo adequado o parâmetro AGUT do modelo BALSEQ, que reflectiria essa alteração na vegetação. Por esta razão optou-se por manter o parâmetro AGUT constante e não analisar a

⁶² A redução menor do escoamento está na ordem dos 1,5% face à taxa de redução da precipitação, para as condições de solos muito pouco permeáveis (NC = 90 ou 91). A redução maior cifra-se nos 7,5%.

⁶³ O equivalente a 6,4% de variação do escoamento superficial face à taxa de variação de precipitação (Quadro XIX).

questão da alteração da vegetação, tanto mais que este é um factor dependente de acções humanas, que reflectirão não apenas uma estratégia de adaptação/mitigação às novas condições como depende também de factores externos ao clima como por exemplo, as políticas agrárias⁶⁴ e de mercado.

Os cenários utilizados de variação de temperatura, a que correspondem os cenários de evapotranspiração usados pelo modelo BALSEQ para estimar os impactos da variação da evapotranspiração sobre a recarga estão apresentados no Capítulo 4.3.1.

5.2.1. CÁLCULO DA RECARGA DE AQUÍFEROS EM CENÁRIOS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO APENAS SOB ALTERAÇÃO TÉRMICA

Neste capítulo estuda-se a variação da recarga vs. variação da evapotranspiração, com base em cenários teóricos (definidos no Capítulo 4) e para os mesmos pares solos/coberto vegetal considerados no sub-capítulo 5.1., tendo como condições de base:

1. condições de AGUT e NC da região do Cabrito, ilha Terceira, definidas em Novo *et al.* (1997);
2. condições de precipitação idênticas às registadas durante a década de 90 para a região do Cabrito;
3. série de evapotranspiração real conhecida para o Cabrito na década de 90, mas alterada segundo um conjunto de valores teóricos progressivamente mais elevados, pretendendo reflectir uma tendência de subida da temperatura média do ar e/ou uma menor humidade atmosférica.

Para estas condições teóricas, os resultados das simulações foram os que se apresentam no Quadro XX e Fig. 47. Se nestes cenários se comparar a variação da evapotranspiração com a da recarga, verifica-se que (Quadros XX e XXI):

- a) A recarga desce com a subida da evapotranspiração.
- b) As reduções são máximas em solos de baixa permeabilidade que possuam coberto vegetal arbóreo (assinalado a rosa), quase decerto devido à maior extracção de água por parte do coberto vegetal, que a direcciona para a evapotranspiração, e que por sua vez poderá ser exacerbada pelas condições de baixa permeabilidade do solo. Note-se que a segunda maior redução na recarga ocorre para cobertura arbórea e solos de mediana a baixa permeabilidade (par AGUT/NC = 182/75); por seu lado uma das reduções menores ocorre para um solo muito pouco permeável e coberto vegetal de reduzida espessura radicular (par AGUT/NC = 18/90), indiciando a efectiva importância do controlo da vegetação sobre a recarga, sobrepondo-se até, pelo menos nalguns casos, às características do solo.
- c) As condições onde a redução de recarga é menor registam-se para coberto de gramíneas e solos de média a alta permeabilidade (assinalado a azul).

⁶⁴ Estas políticas podem também tornar-se parte das estratégias de adaptação às alterações climáticas.

Quadro XX – Variação das Recargas num Mesmo Aquífero Face a Subida das Evapotranspirações

		Cenários de Variação da Evapotranspiração (subida)								
		+1,5%	+ 5%	+ 10%	+ 15%	+ 20%	+ 25%	+ 30%	+ 40%	+ 50%
AGUT/NC	Humidade do solo	Recarga versus séries alteradas de evapotranspiração para o Cabrito (mm/ano)								
186/91	185	617,6	600,9	577,3	555,3	536,5	521,7	508,0	481,7	456,8
	100	603,4	586,7	563,1	541,1	522,3	507,5	493,8	467,5	442,6
182/75	181	1205,7	1187,0	1162,5	1138,8	1115,8	1093,7	1071,8	1028,4	991,6
	100	1192,2	1173,5	1149,0	1125,3	1102,3	1080,2	1058,3	1014,9	978,1
105/56	100	1499,5	1482,8	1460,5	1439,0	1418,3	1397,3	1376,9	1342,3	1308,5
105/1	100	1599,0	1582,0	1559,7	1538,2	1517,4	1496,5	1476,0	1439,5	1404,7
99/83	100	1039,1	1023,9	1004,3	985,2	986,6	952,3	936,7	905,9	875,0
97/61	100	1462,0	1445,6	1424,2	1403,2	1382,4	1361,6	1344,0	1310,4	1276,6
56/38	100	1640,7	1626,9	1608,1	1589,8	1571,9	1554,4	1537,8	1506,0	1474,8
	55	1633,2	1619,4	1600,6	1582,3	1564,4	1546,9	1530,3	1498,5	1467,3
18/90	100	879,2	869,6	856,3	843,0	830,0	817,5	804,5	780,3	757,3
	17	865,4	855,8	842,4	829,1	816,1	803,3	790,7	766,4	743,5
Valor Médio		1186,4	1171,2	1150,7	1130,9	1113,7	1094,4	1077,4	1045,2	1014,7
		Cenários de Variação da Evapotranspiração (subida)								
		+1,5%	+ 5%	+ 10%	+ 15%	+ 20%	+ 25%	+ 30%	+ 40%	+ 50%
AGUT/NC	Humidade do solo	Recarga versus séries alteradas de evapotranspiração para o Cabrito (%)								
186/91	185	-1,2	-3,8	-7,6	-11,1	-14,1	-16,5	-18,7	-22,9	-26,9
	100	-1,2	-3,9	-7,8	-11,4	-14,5	-16,9	-19,1	-23,4	-27,5
182/75	181	-0,8	-2,3	-4,3	-6,3	-8,2	-10,0	-11,8	-15,4	-18,4
	100	-0,8	-2,3	-4,4	-6,3	-8,2	-10,1	-11,9	-15,5	-18,6
105/56	100	-0,5	-1,6	-3,1	-4,5	-5,9	-7,3	-8,6	-10,9	-13,2
105/1	100	-0,5	-1,5	-2,9	-4,2	-5,5	-6,8	-8,1	-10,4	-12,6
99/83	100	-0,7	-2,1	-4,0	-5,8	-5,7	-8,9	-10,4	-13,4	-16,3
97/61	100	-0,5	-1,6	-3,1	-4,5	-5,9	-7,3	-8,5	-10,8	-13,1
56/38	100	-0,4	-1,2	-2,3	-3,5	-4,5	-5,6	-6,6	-8,5	-10,4
	55	-0,4	-1,2	-2,4	-3,5	-4,6	-5,6	-6,6	-8,6	-10,5
18/90	100	-0,5	-1,6	-3,1	-4,6	-6,0	-7,5	-8,9	-11,7	-14,3
	17	-0,5	-1,6	-3,1	-4,6	-6,1	-7,6	-9,1	-11,9	-14,5
Valor Médio		-0,6	-2,1	-4,0	-5,9	-7,4	-9,2	-10,7	-13,6	-16,4

Quadro XXI – Variação da Recarga (valor médio anual) num Mesmo Aquífero Face a Variação das Evapotranspirações (% de Subida)

		Cenários de Variação da Evapotranspiração								
		+1,5%	+5%	+10%	+15%	+20%	+25%	+30%	40%	+50%
AGUT/NC		Factor de multiplicação entre o valor de subida da evapotranspiração e o de descida da recarga								
186/91		-0.80	-0.78	-0.78	-0.76	-0.73	-0.68	-0.64	-0.59	-0.55
182/75		-0.53	-0.46	-0.44	-0.42	-0.41	-0.40	-0.40	-0.39	-0.37
105/56		-0.33	-0.32	-0.31	-0.30	-0.30	-0.29	-0.29	-0.27	-0.26
105/1		-0.33	-0.30	-0.29	-0.28	-0.28	-0.27	-0.27	-0.26	-0.25
99/83		-0.47	-0.42	-0.40	-0.39	-0.29	-0.36	-0.35	-0.34	-0.33
97/61		-0.33	-0.32	-0.31	-0.30	-0.30	-0.29	-0.28	-0.27	-0.26
56/38		-0.27	-0.24	-0.23	-0.23	-0.23	-0.22	-0.22	-0.21	-0.21
18/90		-0.33	-0.32	-0.31	-0.31	-0.30	-0.30	-0.30	-0.29	-0.29

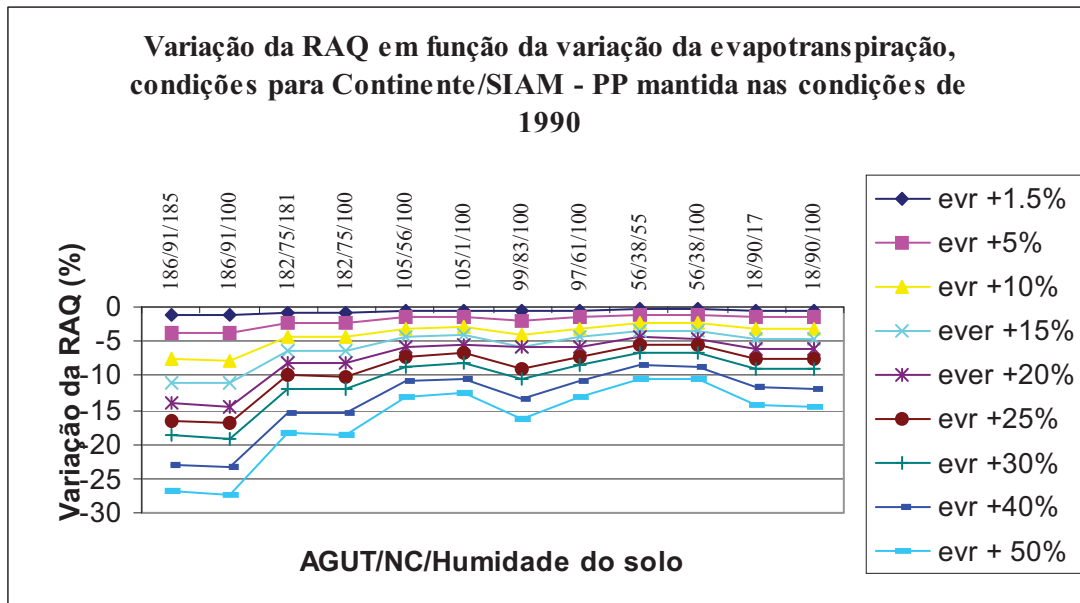


Figura 47 – Variação (em % de variação) da Recarga em Cenários Teóricos Baseados na Possível Variação da Evapotranspiração no Sentido da Subida, Aplicados às Séries de Evapotranspiração para o Cabrito (ilha Terceira)

d) Se se comparar um coberto vegetal de tipo arbustivo/arbóreo e solos muito permeáveis ou moderadamente permeáveis (assinalados a amarelo), verifica-se que o comportamento de redução da recarga é muito similar, e intermédio entre os casos citados nas alíneas b) e c). Tal sugere mais uma vez que, quando se considera a dinâmica evolutiva da evapotranspiração, o coberto vegetal é o controlador preponderante da resposta da recarga às variações do clima.

e) No entanto, quando se compara o comportamento do coberto vegetal de gramíneas (a verde) para solos com permeabilidades distintas, embora muito mais similares do que os casos da cobertura arbustiva/arbórea (a amarelo), o comportamento torna-se diferente. Aqui existe uma variação significativa entre a redução em solos menos permeáveis (a redução é maior) e mais permeáveis, sugerindo que no caso de um coberto vegetal herbáceo a permeabilidade do solo pode ser um parâmetro importante do controle da recarga versus evapotranspiração.

f) Se se comparar a variação da recarga entre o par AGUT/NC = 99/83 (gramíneas em solo pouco permeável) com o de AGUT/NC = 182/75 (arbustivo-arbórea em solo mediano a pouco permeável), se se admitisse apenas a intervenção da permeabilidade, o par AGUT/NC = 99/83 deveria ter uma redução maior da recarga; porém o que ocorre é que a redução maior se verifica no outro par. O que indicia que, embora o solo possa ser importante no controlo da recarga, o factor vegetação é mais significativo.

g) A sublinhar esta ideia encontra-se o par AGUT/NC = 18/90, em que embora as condições de terreno sejam similares às do par AGUT/NC = 186/91, a variação da recarga é significativamente diferente (colocando o par AGUT/NC = 18/90 com um

comportamento similar ao de solos com cobertura dominante de gramíneas/arbustivas (AGUT = 105; valores assinalados a amarelo).

h) Ainda para assinalar a importância da vegetação no controlo da recarga observe-se que os pares AGUT/NC = 18/90, 97/61, 105/1, 105/56 têm iguais reduções de recarga, independentemente das diferentes condições de permeabilidade do solo.

Nas Figs. 48 e 49 apresenta-se a correlação entre a variação das recargas em função das evapotranspirações, respectivamente para percentagens e valores de mm/ano, no caso de cenários de subida das evapotranspirações.

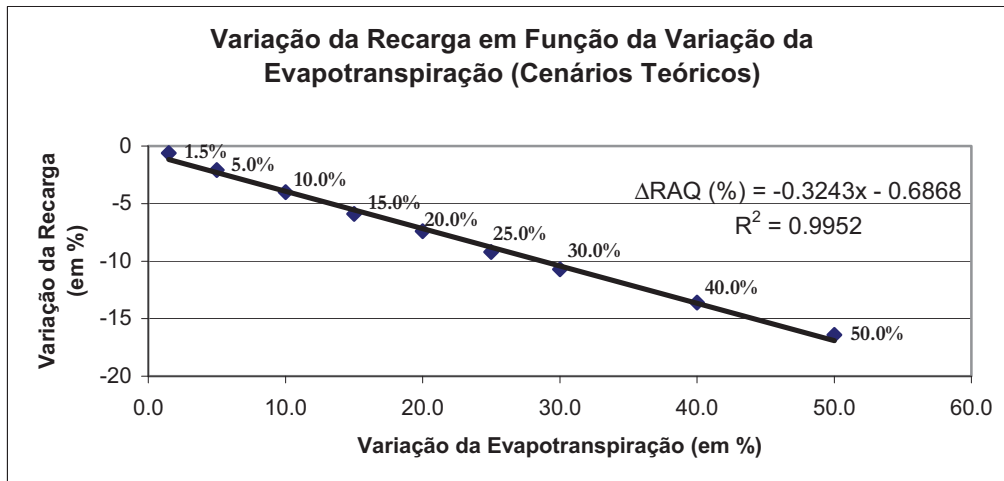


Figura 48 – Correlação da Variação (em %) da Recarga versus Variação da Evapotranspiração (Cenários Teóricos Baseados na Possível Variação da Evapotranspiração no Sentido da Subida, Aplicados às Séries de Evapotranspiração para o Cabrito - ilha Terceira)

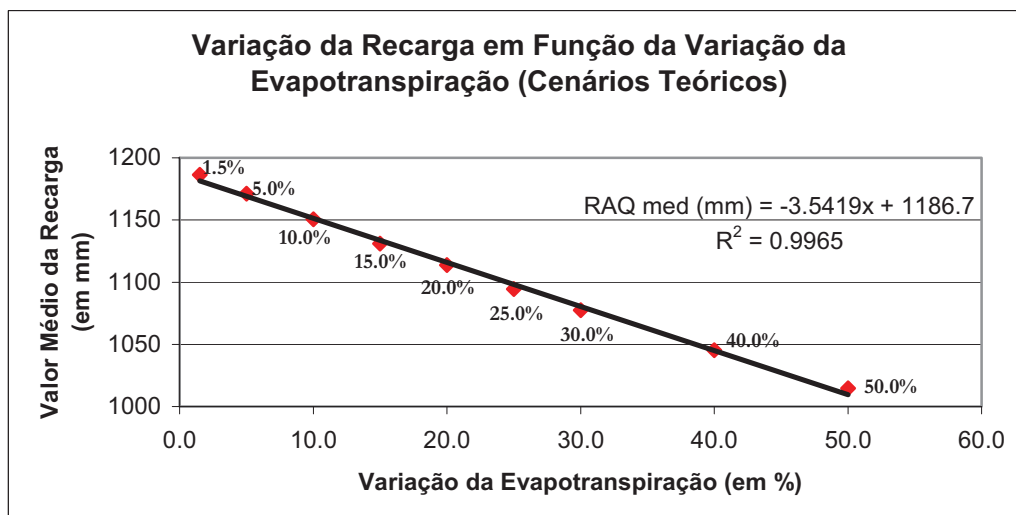


Figura 49 – Correlação do Valor Médio (em mm) da Recarga versus Variação da Evapotranspiração (Cenários Teóricos Baseados na Possível Variação da Evapotranspiração no Sentido da Subida, Aplicados às Séries de Evapotranspiração para o Cabrito - ilha Terceira)

Sendo que de acordo com DROTRH e IA (2001) existe uma leve tendência de descida de temperatura, rejeitada contudo pelo estudo SIAM (2005), e sendo que pela fórmula de Coutagne se verifica que:

1. mantendo a precipitação constante, um aumento da temperatura causa um leve aumento da evapotranspiração;
2. mantendo a precipitação constante, um decréscimo da temperatura causa um leve decréscimo da evapotranspiração;
3. se aumentar a precipitação e temperatura pelo mesmo valor, o aumento na evapotranspiração é significativamente mais acentuado;
4. se aumentar a precipitação e decrescer a temperatura, a evapotranspiração aumenta dentro de um intervalo de valores entre os dois casos anteriores⁶⁵.

E pela fórmula de Turc se verifica que:

1. mantendo a precipitação constante, um aumento da temperatura origina uma subida da evapotranspiração de teor insignificante, podendo considerar-se em termos gerais constante;
2. mantendo a precipitação constante, um decréscimo da temperatura causa um decréscimo da evapotranspiração igualmente insignificante;
3. se aumentar a precipitação e temperatura pelo mesmo valor, o aumento na evapotranspiração é significativamente mais acentuado;
4. se aumentar a precipitação e decrescer a temperatura, a evapotranspiração aumenta igualmente e numa ordem de grandeza similar à da situação anterior⁶⁶.

Como para se ter uma ideia abrangente das alterações climáticas sobre a recarga seria conveniente estudar também a situação teórica da redução da evapotranspiração, mesmo que os mais recentes estudos (SIAM, 2005) apontem para uma evolução tendencialmente oposta⁶⁷, decidiu-se simular o efeito da descida da evapotranspiração sobre as recargas. As condições de base para os diversos cenários usados são:

1. condições de AGUT e NC da região do Cabrito, ilha Terceira, definidas em Novo *et al.* (1997);
2. condições de precipitação idênticas às registadas durante a década de 90 para a região do Cabrito;
3. série de evapotranspiração real conhecida para o Cabrito na década de 90, mas alterada segundo um conjunto de valores teóricos progressivamente mais

⁶⁵ Apontando para um controlo efectivo entre a precipitação e a temperatura sobre a evapotranspiração.

⁶⁶ O que indica que neste método o factor que tem maior controlo sobre a variação da evapotranspiração é a precipitação, dado que mesmo quando se baixa a temperatura a evapotranspiração aumenta de forma significativa.

⁶⁷ No caso, aponta para um aumento das temperaturas, em especial as máximas de Verão e portanto, para um mesmo coberto vegetal e na existência de água suficiente para tal, um aumento da evapotranspiração.

Impactos das Alterações Climáticas: Mudanças nos Regimes de Precipitação e seus Impactos sobre a Recarga de Aquíferos

reduzidos, pretendendo reflectir uma tendência de descida da temperatura média do ar e/ou uma maior humidade atmosférica.

Para estas condições teóricas, os resultados das simulações foram os seguintes (Quadro XXII, vide Fig. 50). Se nestes cenários se comparar a variação da evapotranspiração com a da recarga, verifica-se que (Quadros XXII e XXIII):

Quadro XXII – Variação das Recargas num Mesmo Aquífero Face a Descida das Evapotranspirações

		Cenários de Variação da Evapotranspiração (descida)					
		- 5%	- 10%	- 15%	- 20%	- 25%	- 30%
AGUT/NC	Humidade do solo	Recarga versus séries alteradas de evapotranspiração para o Cabrito (mm/ano)					
186/91	185	650,0	677,5	708,2	740,4	772,4	804,6
	100	635,8	663,4	694,0	726,2	758,3	790,4
182/75	181	1247,1	1279,2	1311,4	1343,5	1375,6	1407,8
	100	1233,6	1265,7	1297,9	1330,0	1362,1	1394,3
105/56	100	1531,7	1556,2	1580,7	1605,4	1631,0	1660,9
105/1	100	1631,1	1655,6	1680,1	1704,8	1730,5	1760,4
99/83	100	1068,4	1091,0	1114,2	1137,9	1162,6	1188,9
97/61	100	1494,1	1518,7	1543,2	1567,8	1592,3	1619,3
56/38	100	1667,2	1687,4	1708,9	1731,3	1754,7	1779,3
	55	1659,7	1680,4	1701,4	1723,8	1747,2	1771,8
18/90	100	897,4	911,6	925,9	941,2	957,2	973,6
	17	883,6	897,7	912,0	927,4	943,4	959,7
Valor Médio		1216,6	1240,4	1264,8	1290,0	1315,6	1342,6
		Cenários de Variação da Evapotranspiração (descida)					
		- 5%	- 10%	- 15%	- 20%	- 25%	- 30%
AGUT/NC	Humidade do solo	Recarga versus séries alteradas de evapotranspiração para o Cabrito (%)					
186/91	185	+4,0	+8,4	+13,3	+18,5	+23,6	+28,8
	100	+4,1	+8,6	+13,7	+18,9	+24,2	+29,4
182/75	181	+2,7	+5,3	+7,9	+10,6	+13,2	+15,9
	100	+2,7	+5,4	+8,0	+10,7	+13,4	+16,1
105/56	100	+1,6	+3,3	+4,9	+6,5	+8,2	+10,2
105/1	100	+1,5	+3,1	+4,6	+6,1	+7,7	+9,6
99/83	100	+2,2	+4,3	+6,5	+8,8	+11,2	+13,7
97/61	100	+1,7	+3,4	+5,0	+6,7	+8,4	+10,2
56/38	100	+1,2	+2,5	+3,8	+5,1	+6,6	+8,1
	55	+1,3	+2,5	+3,8	+5,2	+6,6	+8,1
18/90	100	+1,6	+3,2	+4,8	+6,5	+8,4	+10,2
	17	+1,6	+3,2	+4,9	+6,7	+8,5	+10,4
Valor Médio		+2,2	+4,4	+6,8	+9,2	+11,7	+14,2

a) A recarga sobe para a descida da evapotranspiração. As condições de maior subida de recarga registam-se para um coberto arbóreo e solo pouco permeável (assinalado a rosa⁶⁸; cf. também Quadro XXII), o que pode indiciar que, para a mesma quantidade de precipitação, o coberto vegetal retire um menor volume de água (a mudança na temperatura pode reduzir as necessidades em água), e portanto, do volume

⁶⁸ Note-se que como a relação evapotranspiração/recarga é inversa, como a evapotranspiração decresce, a relação negativa evapotranspiração/recarga assinala uma subida da recarga.

disponível para a infiltração, uma maior parcela – relativamente à situação de referência – seja conduzida à recarga, não importa o que possa suceder com o escoamento. Note-se que, em termos absolutos (cf. parte superior do Quadro XXII) e comparando com as outras condições vegetação/solo considerados, esta é a situação em que ocorre menor recarga, ou seja, em que o escoamento superficial é a parcela preponderante.

b) As condições de menor subida da recarga – relativamente à situação de referência – ocorrem em vegetação de herbáceas e solos de alta a média permeabilidade (assinalados a azul), talvez porque as condições de recarga máxima tenham sido atingidas à partida. Note-se que em termos absolutos esta é a situação em que os valores de recarga são maiores (cf. parte superior do Quadro XXII).

Quadro XXIII – Variação da Recarga (valor médio anual) num Mesmo Aquífero Face a Variação das Evapotranspirações (% de Descida)

	Cenários de Variação da Evapotranspiração (descida)					
	- 5%	- 10%	- 15%	- 20%	- 25%	- 30%
AGUT/NC	Factor de multiplicação entre o valor de descida da evapotranspiração e o de subida da recarga					
186/91	-0.82	-0.86	-0.91	-0.95	-0.97	-0.98
182/75	-0.54	-0.54	-0.53	-0.54	-0.54	-0.54
105/56	-0.32	-0.33	-0.33	-0.33	-0.32	-0.34
105/1	-0.30	-0.31	-0.31	-0.31	-0.31	-0.32
99/83	-0.44	-0.43	-0.43	-0.44	-0.45	-0.46
97/61	-0.34	-0.34	-0.33	-0.34	-0.37	-0.34
56/38	-0.24	-0.25	-0.25	-0.26	-0.26	-0.27
18/90	-0.32	-0.32	-0.32	-0.33	-0.34	-0.34

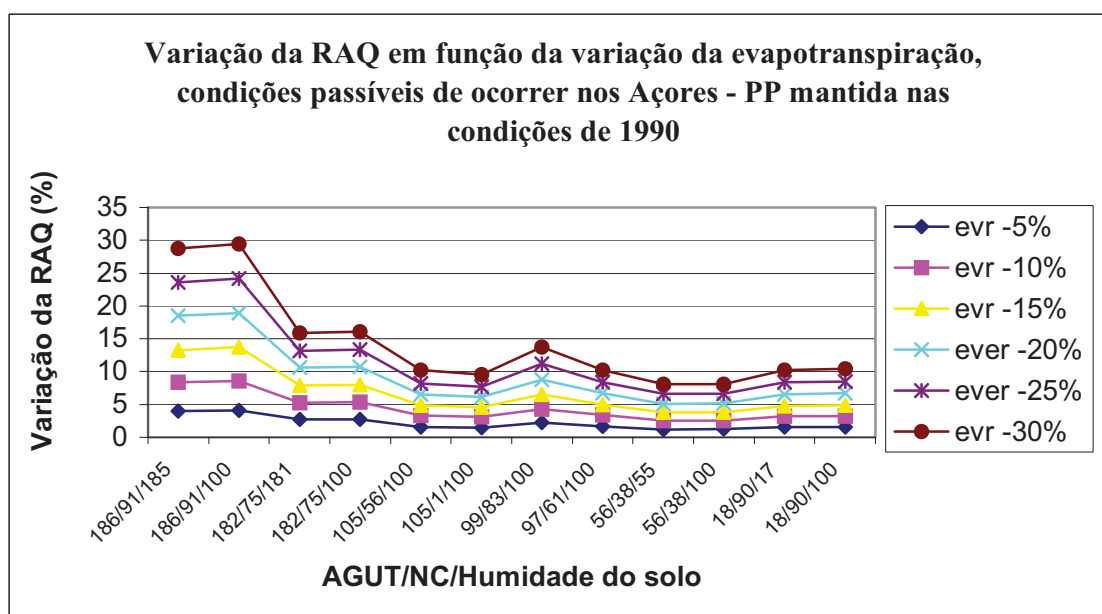


Figura 50 – Variação (em % de variação) da Recarga em Cenários Teóricos Baseados na Possível Variação da Evapotranspiração para os Açores, Aplicados às Séries de Precipitação para o Cabrito (ilha Terceira)

c) As zonas de coberto arbustivo/arbóreo, independentemente da permeabilidade do solo (a amarelo), assim como as zonas de coberto herbáceo com baixa espessura radicular e solos pouco permeáveis (par AGUT/NC = 18/90) mostram comportamento muito similar. Isto pode indiciar que para condições de solo muito a medianamente permeável, a cobertura arbórea tem um controlo semelhante sobre a recarga, que por sua vez é similar ao de um coberto vegetal com baixa espessura radicular e solos pouco permeáveis, embora seja de admitir que as condições de controlo da recarga possam ser bastante distintos nestes dois tipos de situação. Este comportamento, não muito diverso do que se verificou para os cenários de subida da evapotranspiração, aponta para um forte controlo da vegetação neste processo.

d) As zonas com coberto de gramíneas (a verde) mostram um comportamento distinto consoante a permeabilidade do solo. Para solos menos permeáveis, a taxa de variação da recarga (no caso, subida) é maior do que em solos mais permeáveis, indiciando que para este tipo de vegetação, talvez por haver uma menor área foliar para a evapotranspiração, as características hidráulicas do solo tornam-se importantes no controlo da recarga versus evapotranspiração.

e) Também num comportamento paralelizável com o da evolução da recarga no caso da subida da evapotranspiração, os pares AGUT/NC = 18/90, 97/61, 105/1, 105/56 têm similares taxas de subida de recarga, apesar das diferentes permeabilidades do solo, o que aponta para a efectiva importância da vegetação no controlo da recarga num leque alargado de situações, desempenhando as propriedades hidráulicas do solo um aspecto subalterno, que contudo pode ser significativo em dadas condições (cf. alínea d) acima).

Nas Figs. 51 e 52 encontra-se exemplificada a correlação entre a variação das recargas em função das evapotranspirações, respectivamente para percentagens e valores de mm/ano, no caso de cenários de descida das evapotranspirações.

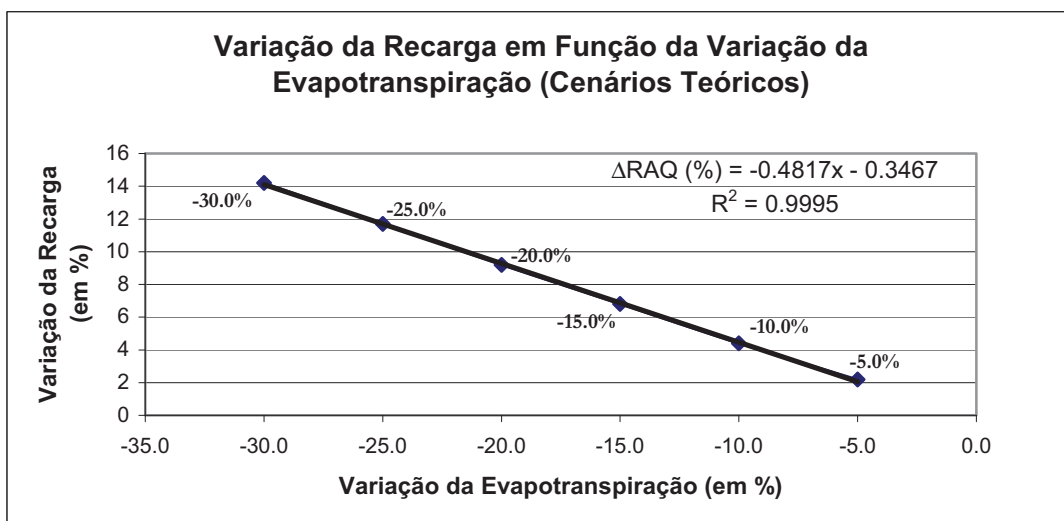


Figura 51 – Correlação da Variação (em %) da Recarga versus Variação da Evapotranspiração (Cenários Teóricos Baseados na Possível Variação da Evapotranspiração no Sentido da Descida, Aplicados às Séries de Evapotranspiração para o Cabrito - ilha Terceira)

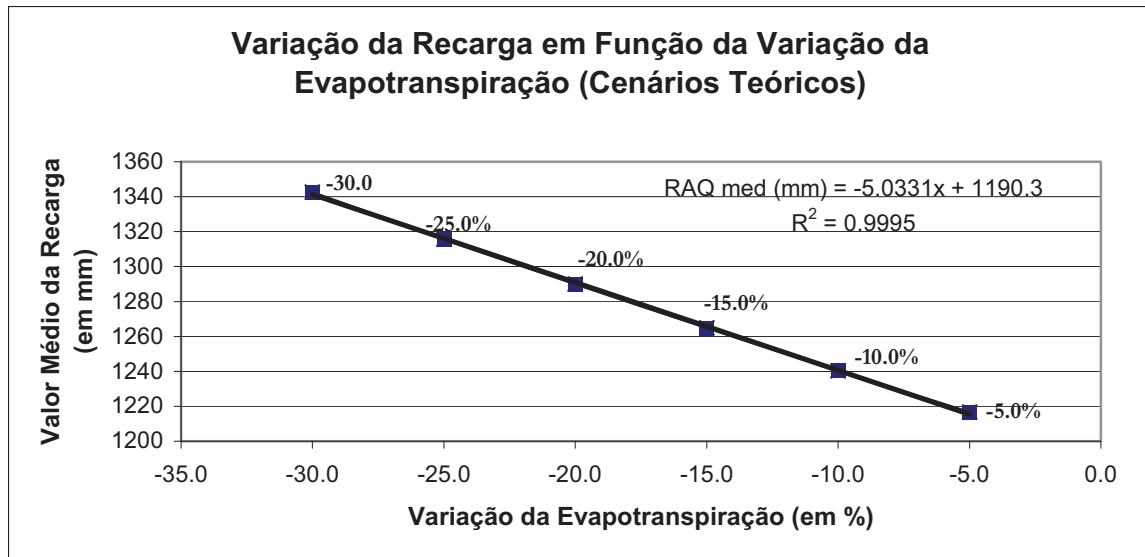


Figura 52 – Correlação do Valor Médio (em mm) da Recarga versus Variação da Evapotranspiração (Cenários Teóricos Baseados na Possível Variação da Evapotranspiração no Sentido da Descida, Aplicados às Séries de Evapotranspiração para o Cabrito - ilha Terceira)

Considerando a totalidade das duas tendências (subida e descida), e dado os respectivos valores de regressão parecerem apresentar comportamento aproximado, averiguou-se se os cenários de subida ou descida agora apresentados poderiam ter uma relação linear. Os resultados desta investigação apresentam-se nas Figs. 53 e 54.

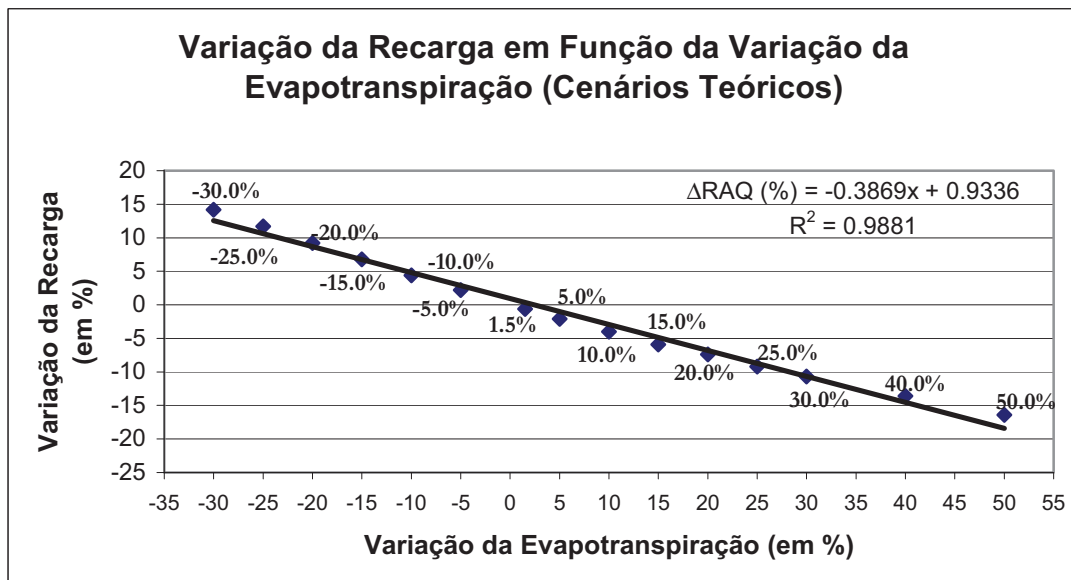


Figura 53 – Correlação da Variação (em %) da Recarga versus Variação da Evapotranspiração (Totalidade dos Cenários Teóricos de Variação da Evapotranspiração, Aplicados às Séries de Evapotranspiração para o Cabrito - ilha Terceira)

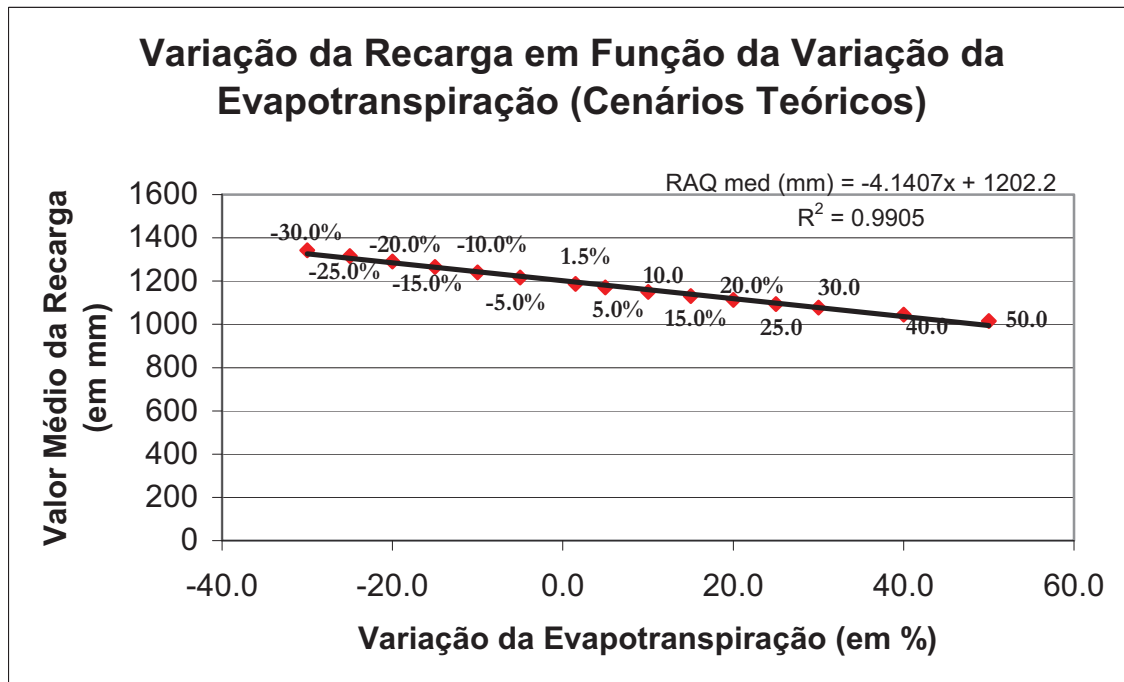


Figura 54 – Correlação do Valor Médio (em mm) da Recarga versus Variação da Evapotranspiração (Totalidade dos Cenários Teóricos de Variação da Evapotranspiração, Aplicados às Séries de Evapotranspiração para o Cabrito - ilha Terceira)

Tal como para a precipitação, mais uma vez se sublinha que a recarga não depende apenas da evapotranspiração mas da conjugação desta com a precipitação e o escoamento superficial, entre outros aspectos. Com a análise que agora se realiza o que se pretende é apenas verificar, para condições estritamente teóricas, o impacto das alterações nos valores da evapotranspiração, deduzíveis a partir de alguns cenários de alteração climática, sobre a recarga num determinado conjunto de solos, passíveis de representar as condições mais comuns das zonas de recarga da ilha Terceira. Assim, com base nos resultados obtidos acima, verifica-se que para:

- **Cenário de subida de evapotranspiração de 1,5%** – a recarga desce em média cerca de 0,6%, sendo as reduções mais intensas (1,2%) registadas para o par AGUT/NC = 186/91 e as menos intensas (0,4%) para o par AGUT/NC = 56/38.
- **Cenário de subida de evapotranspiração de 5%** – a redução média da recarga é de cerca de 2%, com a maior redução (4%) para o par AGUT/NC = 186/91 e a menor (1,2%) para o par AGUT/NC = 56/38.
- **Cenário de subida de evapotranspiração de 10%** – a recarga reduz-se em média cerca de 4%, com as maiores reduções (cerca de 8%) afectando o par AGUT/NC = 186/91 e as menores (2,4%) o par AGUT/NC = 56/38.

- ***Cenário de subida de evapotranspiração de 15%*** – em média a recarga reduz-se em cerca de 6%, sendo as maiores reduções (11%) observadas para o par AGUT/NC = 186/91 e as menores (3,5%) para o par AGUT/NC = 56/38.
- ***Cenário de subida de evapotranspiração de 20%*** – a recarga reduz-se em média cerca de 7,5%; as maiores reduções (14%) registam-se para o par AGUT/NC = 186/91 enquanto as menores (4,5%) afectam o par AGUT/NC = 56/38.
- ***Cenário de subida de evapotranspiração de 25%*** – a redução média da recarga é de cerca de 9%, registando-se a redução máxima (cerca de 17%) para o par AGUT/NC = 186/91 e a redução mínima (5,6%) para o par AGUT/NC = 56/38.
- ***Cenário de subida de evapotranspiração de 30%*** – a redução média da recarga é de cerca de 11%, sendo a redução máxima (cerca de 19%) registada para o par AGUT/NC = 186/91 e a redução mínima (6,6%) para o par AGUT/NC = 56/38.
- ***Cenário de subida de evapotranspiração de 40%*** – a recarga reduz-se em média cerca de 13,6%, sendo a redução máxima (cerca de 23%) observada para o par AGUT/NC = 186/91 e a redução mínima (8,5%) para o par AGUT/NC = 56/38.
- ***Cenário de subida de evapotranspiração de 50%*** – a recarga reduz-se em 16,4%, sendo a redução máxima (cerca de 27%) registada para o par AGUT/NC = 186/91 e a mínima (10,5%) para o par AGUT/NC = 56/38.
- ***Cenário de descida de evapotranspiração de 5%*** – o valor médio da recarga sobe cerca de 2%, sendo as maiores subidas registadas (4%) para o par AGUT/NC = 186/91 e as menores (1,3%) para o par AGUT/NC = 56/38.
- ***Cenário de descida de evapotranspiração de 10%*** – o valor médio da recarga sobe cerca de 4,4%, sendo as maiores subidas (8,5%) registadas para o par AGUT/NC = 186/91 e as menores (2,5%) para o par AGUT/NC = 56/38.
- ***Cenário de descida de evapotranspiração de 15%*** – a recarga sobe em média cerca de 7%, sendo as maiores subidas (13,5%) registadas para o par AGUT/NC = 186/91 e as menores (cerca de 4%) para o par AGUT/NC = 56/38.
- ***Cenário de descida de evapotranspiração de 20%*** – a recarga sobe em média cerca de 9%, com as maiores subidas (cerca de 19%) a registarem-se para o par AGUT/NC = 186/91 e as menores (cerca de 5%) para o par AGUT/NC = 56/38.
- ***Cenário de descida de evapotranspiração de 25%*** – a recarga sobe em média cerca de 12%, com as maiores subidas (cerca de 24%) a registarem-se para o par AGUT/NC = 186/91 e as menores (6,6%) para o par AGUT/NC = 56/38.
- ***Cenário de descida de evapotranspiração de 30%*** – a recarga tem uma subida média de 14%, registando-se os maiores acréscimos (cerca de 29%) para o par AGUT/NC = 186/91 e os menores (cerca de 8%) para o par AGUT/NC = 56/38.

Como era de prever nestes cenários simplificados, a variação da recarga é inversamente proporcional à alteração da evapotranspiração, e as maiores perdas, assim como os maiores incrementos de recarga, ocorrem no par AGUT/NC = 186/91. Em regra o valor médio de variação da recarga, para regiões com as condições do Cabrito (uma zona preferencial de infiltração), é cerca de metade da variação global da evapotranspiração, quando esta sofre pequenas variações. Com uma maior alteração da evapotranspiração, a variação da recarga afasta-se da “metade da variação global da evapotranspiração” (cf. um subida de evapotranspiração de 50%, correspondida por uma descida média de recarga de 16%), a indiciar uma menor relação de proporcionalidade⁶⁹ entre a variação da evapotranspiração e recarga do que sucedia no caso da precipitação. Verifica-se que, neste caso, a vegetação exerce uma importante influência, observando-se que as zonas onde a variação de recarga é mais significativa são as que correspondem a um coberto vegetal com grande desenvolvimento radicular e ao mesmo tempo a um solo com maior tendência impermeável. Tipicamente as zonas de solos com maiores permeabilidades registam as variações menores, sobretudo se o coberto vegetal tiver uma profundidade radicular mediana a baixa. Isto aponta para, não apenas a importância da permeabilidade dos solos na resposta a alterações da parte superficial do ciclo hídrico mas também para a extrema importância do coberto vegetal na regulação hídrica dos aquíferos em situações de subida (ou de descida) global das temperaturas atmosféricas.

De referir que a questão das alterações na evapotranspiração é importante não apenas pelo seu potencial de remover água de outro modo disponível para a recarga mas também ao nível da qualidade dos recursos hídricos o seu impacto pode ser importante. Segundo SIAM (2002), um aumento da evapotranspiração promove condições de potencial incremento da salinização dos solos e transmissão de sais aos aquíferos.

Uma análise do comportamento da variação da recarga em função da variação da evapotranspiração para os vários pares NC/AGUT, está representada nas Figs. 55 e 56, para uma capacidade de campo inicial = 100 mm. Apesar de representarem um quadro simplificado (os cenários admitem variação constante da evapotranspiração ao longo do ano, o que na realidade não ocorrerá) as rectas de regressão das Figs. 55 e 56 podem ser utilizadas para os respectivos pares de solo/coberto vegetal (NC/AGUT), para previsões mui simplificadas de alteração da recarga em função da alteração da evapotranspiração. Em termos gerais verifica-se que:

- **Subida da evapotranspiração:**

- **Par 186/91** – é o que apresenta uma mais acentuada descida da recarga com a subida da evapotranspiração. Isto sublinha a importância da vegetação no controlo deste processo, dado ser o coberto arbóreo o que regista a descida mais acentuada da recarga.
- **Par 56/38** – é o que apresenta a mais lenta descida da recarga face à subida da evapotranspiração.

⁶⁹ E também de linearidade; no conjunto dos cenários de precipitação/recarga $R^2 = 0,9976$ ao passo que no conjunto dos cenários de evapotranspiração/recarga $R^2 = 0,9881$.

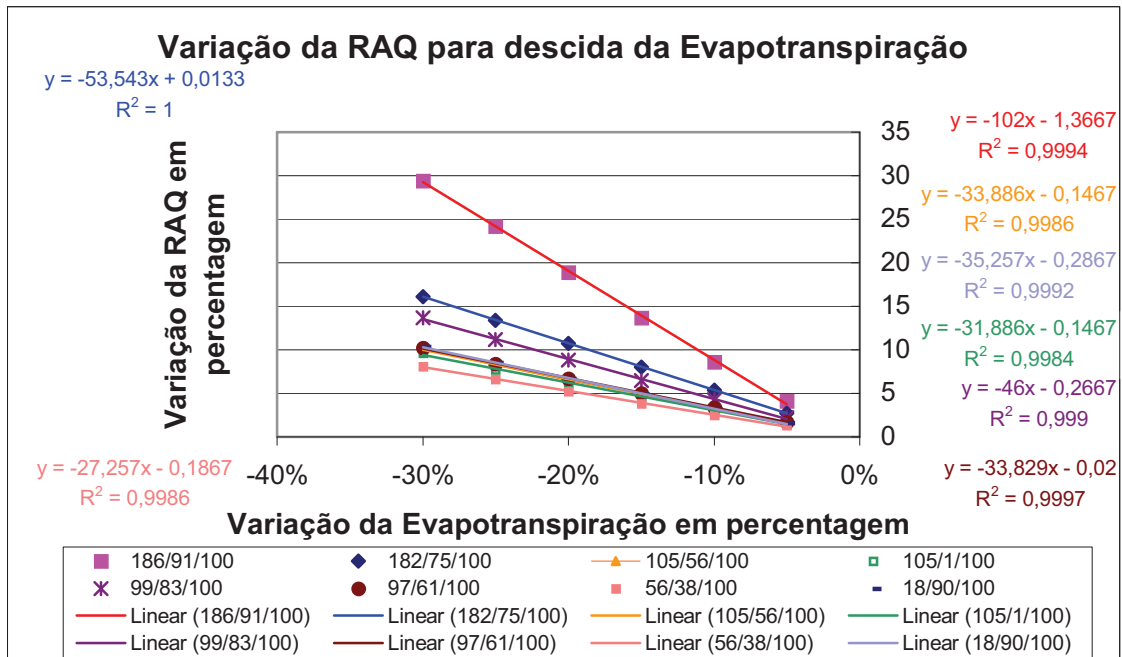


Figura 55 – Varição da Recarga por Tipo de Solo/Vegetação para Cenários de Descida da Evapotranspiração (Aplicados às Séries de Evapotranspiração para o Cabrito - ilha Terceira)

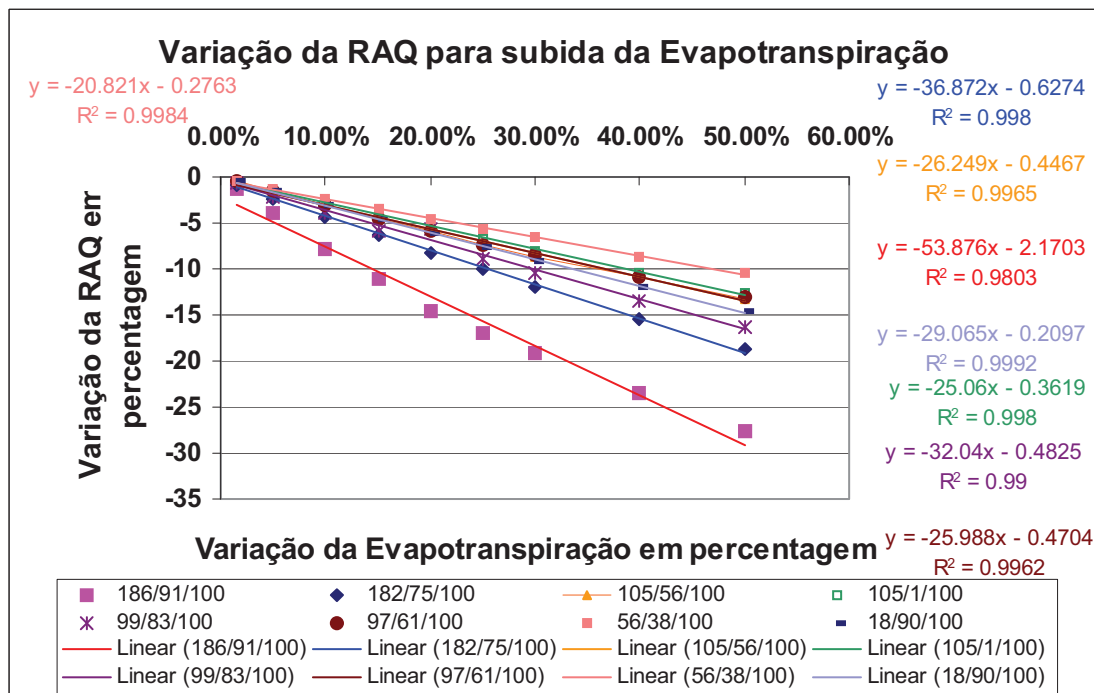


Figura 56 – Varição da Recarga por Tipo de Solo/Vegetação para Cenários de Subida da Evapotranspiração (Aplicados às Séries de Evapotranspiração para o Cabrito - ilha Terceira)

- **Descida da evapotranspiração:**

- **Par 186/91** – é o que apresenta um mais acentuado aumento da recarga com a descida da evapotranspiração
- **Par 56/38** – é o que apresenta a mais lenta subida da recarga face à redução da evapotranspiração. Isto pode indicar que a cobertura de gramíneas no geral causa menores oscilações na recarga que outros tipos de vegetação, e que esse efeito é ainda mais reduzido em solos de permeabilidade intermédia a alta.

Numa terceira fase simulou-se o efeito simultâneo das variações da evapotranspiração e da precipitação sobre a recarga para os mesmos solos, a partir de cenários construídos com base em DROTRH e IA (2001), que indiciam uma tendência de subida da precipitação média anual e descida da temperatura média anual, com a consequência – conforme as fórmulas de Turc e de Coutagne – de uma potencial subida da evapotranspiração. Foram admitidas as seguintes condições de base:

1. condições de AGUT e NC da região do Cabrito, ilha Terceira, definidas em Novo *et al.* (1997);
2. série de evapotranspiração real conhecida para o Cabrito na década de 90, alterada segundo um conjunto de valores teóricos que reflectam uma tendência de descida da temperatura média do ar e/ou uma maior humidade atmosférica, de acordo com as projecções definidas em DROTRH e IA (2001) e SIAM (2003);
3. série de precipitação diária conhecida para o Cabrito na década de 90, mas alterada segundo um conjunto de valores teóricos que reflectam uma tendência de subida da temperatura média do ar e/ou uma menor humidade atmosférica, de acordo com as projecções definidas em DROTRH e IA (2001) e SIAM (2003);

Para estas condições teóricas, os resultados das simulações foram os seguintes (Quadro XXIV). Destes resultados conclui-se que:

- **Cenário 1** – a recarga sofre uma subida média de 5%, registando-se os maiores acréscimos (cerca de 7%) para o par AGUT/NC = 105/1 e os menores (cerca de 3%) para o par AGUT/NC = 18/90. Para os solos de permeabilidade intermédia, o coberto de gramíneas (par AGUT/NC = 56/38) parece ser mais favorável a um aumento da recarga que um coberto mais arbóreo (par AGUT/NC = 105/56).

O primeiro facto que ressalta deste cenário é o de que, para uma subida moderada da precipitação e uma subida discreta da evapotranspiração, o volume total de recarga ainda assim aumenta. Os valores registados parecem mais uma vez apontar para que, num cenário de subida moderada de recarga, as zonas actualmente menos permeáveis são as que sofrem um menor incremento da recarga e portanto serão as áreas em maior risco de sofrerem impactos mais adversos. Em contrapartida as zonas de permeabilidade média e que simultaneamente possuam uma vegetação com uma espessura radicular moderada serão das mais favorecidas pelo aumento da precipitação,

e registrarão um dos maiores acréscimos da recarga. As regiões de permeabilidade muito elevada, e para as condições consideradas, registrarão o maior aumento da recarga mesmo na presença de um coberto vegetal arbustivo/arbóreo (par AGUT/NC = 105/1), o que indicará que nestas circunstâncias as condições de permeabilidade são um factor muito importante a ter em conta. Como para estes solos de mui elevada permeabilidade não foram definidas coberturas de gramíneas, não é possível determinar, para este cenário de alteração da precipitação + evapotranspiração qual das duas coberturas (para um NC = 1) será a mais favorável à recarga. Convirá, em estudos posteriores, estudar mais pormenorizadamente o comportamento destes solos para diferentes tipos de coberto vegetal.

Quadro XXIV – Variação das Recargas em Função da Alteração na Evapotranspiração e Precipitação em Conformidade com os Cenários de Alteração Climática Previstos para os Açores por SIAM (2003) e Brito e Gonçalves (2001)

		Cenários de Variação da Evapotranspiração e Precipitação
		Cenário 1
AGUT/NC	Humidade do solo	Recarga versus séries alteradas de evapotranspiração/precipitação para o Cabrito (mm/ano)
186/91	185	650.6
	100	636.4
182/75	181	1283.3
	100	1269.8
105/56	100	1603.7
105/1	100	1721.2
99/83	100	1096.8
97/61	100	1561.4
56/38	100	1756.0
	55	1748.5
18/90	100	909.4
	17	895.5
Valor Médio		1261.1
		Cenários de Variação da Evapotranspiração e Precipitação
		Cenário 1
AGUT/NC	Humidade do solo	Recarga versus séries alteradas de evapotranspiração/precipitação para o Cabrito (%)
186/91	185	4.1
	100	4.2
182/75	181	5.6
	100	5.7
105/56	100	6.4
105/1	100	7.1
99/83	100	4.9
97/61	100	6.3
56/38	100	6.6
	55	6.7
18/90	100	2.9
	17	3.0
Valor Médio		5.3

Cenário 1 – Precipitação sobe cerca de 6%; evapotranspiração potencial sobe 1,5%; valores obtidos segundo inferência do trabalho de DROTRH e IA (2001).

Se nestes cenários se comparar a variação da precipitação + evapotranspiração com a da recarga, verifica-se que (Quadro XXV):

Impactos das Alterações Climáticas: Mudanças nos Regimes de Precipitação e seus Impactos sobre a Recarga de Aquíferos

a) A subida da recarga é máxima para solos de permeabilidade muito elevada (a azul) e mínima para solos de baixa permeabilidade, com cobertura herbácea de baixa espessura radicular (a rosa).

b) Tipicamente são os solos menos permeáveis (a amarelo e rosa) os que registam as menores subidas de recarga, verificando-se que esta é mínima para cobertos com reduzida espessura radicular (AGUT/NC = 18/90; linha a rosa) e solos pouco permeáveis. A segunda maior subida regista-se para cobertos arbóreos (par AGUT/NC = 186/91), apesar do solo ser um pouco mais impermeável do que o do par anterior. O coberto de gramíneas (par AGUT/NC = 99/83), correspondente a um solo mais permeável, apresenta a maior subida dos três casos em análise, o que será expectável tanto devido às propriedades do solo como à eventual menor evapotranspiração desta cobertura vegetal, talvez devida a uma menor quantidade de superfície foliar face ao coberto arbóreo.

c) O comportamento das recargas para os pares AGUT/NC = 18/90 e 186/91 indicia que, nestes cenários, para solos muito pouco permeáveis, não são apenas as propriedades hidráulicas que desempenham um papel significativo no controlo da recarga mas também o tipo de vegetação. De facto, se se observarem os resultados (Quadro XXVI) verifica-se que as variações de recarga são muito diferentes em ambos os casos, apesar das propriedades hidráulicas dos respectivos solos serem próximas.

d) Se por seu lado compararmos cobertos vegetais similares para tipos de solos distintos (ex.: pares AGUT/NC = 99/83 e 97/61, ou os pares 105/56 e 105/1) verificamos que as propriedades hidráulicas dos solos desempenham um papel muito importante no controlo da recarga.

e) Assim, no caso em que ocorra variação da precipitação e da evapotranspiração a importância relativa quer das propriedades hidráulicas do solo, quer da vegetação no controlo da recarga torna-se muito mais expressiva. Contudo, para um mais completo esclarecimento destas questões, seria necessário em estudos posteriores aprofundar estas relações, quer com mais modelação matemática, considerando mais cenários e mais pares AGUT/NC, quer com trabalhos experimentais.

Quadro XXV – Variação da Recarga (valor médio anual) num Mesmo Aquífero Face a Variação das Evapotranspiração (% de Descida) e Precipitação (% de Subida)

AGUT/NC	Cenários de Variação da Evapotranspiração e Precipitação
	Cenário 1
	Factor de multiplicação entre o valor de subida da precipitação e o de subida da recarga
186/91	0.70
182/75	0.95
105/56	1.07
105/1	1.18
99/83	0.82
97/61	1.05
56/38	1.10
18/90	0.48

Passando à análise da evolução do escoamento superficial para o mesmo cenário de alteração da precipitação + evapotranspiração, inferido do trabalho de DROTRH e IA (2001), os resultados obtidos foram os seguintes (Quadro XXVI):

Quadro XXVI – Variação do Escoamento Superficial (valor médio anual) num Mesmo Aquífero Face a Variação Simultânea dos Valores de Precipitação e Evapotranspiração

Cenários de Variação da Evapotranspiração e Precipitação	
Cenário 1	
AGUT/NC	Escoamento superficial versus séries alteradas de evapotranspiração/precipitação para o Cabrito (mm/ano)
186/91	1047,1
182/75	399,8
105/56	117,5
99/83	638,9
97/61	167,6
56/38	16,7
18/90	980,8
Valor Médio	421,1
Cenários de Variação da Evapotranspiração e Precipitação	
Cenário 1	
AGUT/NC	Escoamento superficial versus séries alteradas de evapotranspiração/precipitação para o Cabrito (%)
186/91	9,5
182/75	13,2
105/56	18,2
99/83	11,4
97/61	16,7
56/38	8,4
18/90	9,7
Valor Médio	10,9

Neste cenário, mesmo se nem toda a água disponibilizada pelo aumento de precipitação se encontre disponível para o escoamento (ou a recarga) devido ao aumento da evapotranspiração⁷⁰, verifica-se apesar de tudo um aumento do escoamento superficial de cerca 11%, em média, face à situação de referência (Quadro XXVII), para o total de pares de ocupação do solo/tipo de solo considerados. As situações com maior incremento são as de solos com capacidade de infiltração intermédia, quer para um coberto arbustivo/arbóreo quer para um coberto herbáceo (pares AGUT/NC = 105/56 e 97/61). Os solos de muito elevada capacidade de infiltração (NC = 1) não sofrem qualquer alteração do seu escoamento superficial, como aliás se verificou para cenários anteriores.

Se se comparar a variação da precipitação com a variação do escoamento, verifica-se que (Quadro XXVII) o escoamento superficial aumenta face à precipitação de forma muito idêntica à verificada para os cenários de subida de precipitação = 6% sem aumento da evapotranspiração. Isto sugere que uma subida da evapotranspiração de

⁷⁰ O aumento da evapotranspiração é contudo inferior ao da precipitação, o que causa de facto um excedente de água tanto para recarga como para escoamento, mesmo que, obviamente, este excedente seja

Impactos das Alterações Climáticas: Mudanças nos Regimes de Precipitação e seus Impactos sobre a Recarga de Aquíferos

1,5% talvez não seja suficiente para causar impactos significativos no escoamento se for acompanhada de uma subida da precipitação pelo menos 4 x superior. Em face destes resultados considera-se ser necessário realizar trabalhos posteriores com vista à clara definição do limiar da variação da evapotranspiração relativamente à precipitação, a partir do qual a primeira passa a exercer uma influência sensível na evolução do escoamento superficial.

Quadro XXVII – Variação do Escoamento Superficial (valor médio anual) num Mesmo Aquífero Face a Variação Simultânea dos Valores de Precipitação e Evapotranspiração

	Cenários de Variação da Evapotranspiração e Precipitação	
	Cenário 1	
AGUT/NC	Factor de multiplicação entre o valor de subida da precipitação e o de subida do escoamento superficial	
186/91	1.58	
182/75	2.20	
105/56	3.03	
99/83	1.90	
97/61	2.78	
56/38	1.40	
18/90	1.62	

Cenário 1 – Precipitação sobe cerca de 6%; evapotranspiração sobe 1,5%; valores obtidos segundo inferência de DROTRH e IA (2001).

5.3. Efeitos das Alterações nos Regimes, Intensidades e Frequências de Eventos Extremos sobre a Recarga de Aquíferos

Como foi referido nos capítulos anteriores, no estado actual dos conhecimentos, não é possível determinar tendências ou cenários de alteração das frequências, durações e intensidades de ciclones, tempestades tropicais e outros tipos de precipitação torrencial, ou dos períodos de seca para a região dos Açores, pelo que não será possível determinar os impactos que as alterações destes fenómenos terão para a recarga. IPCC (2007) refere que os cenários de alteração climática, e os registos das observações, indiciam um aumento na intensidade das tempestades tropicais mas não é ainda possível quantificar tendências evolutivas de intensidades ou de n.º de ocorrências por ano. De acordo com os resultados dos modelos climáticos (cf. SIAM, 2005), existirá uma tendência para o aumento das precipitações concentradas, o que poderá favorecer a resposta dos sistemas no sentido de um maior escoamento superficial, mas não existem ainda dados suficientes para uma quantificação das tendências de alterações nas precipitações concentradas, pelo que não será possível projectar as alterações no escoamento que daí podem advir.

inferior ao que existiria num cenário de aumento de precipitação idêntico mas onde a evapotranspiração permanecesse constante.

5.4. A Recarga de Aquíferos nas Ilhas dos Açores para Vários Cenários de Precipitação e Evapotranspiração: Conclusões

Para compreender os impactos das alterações climáticas sobre os processos de recarga é necessário conhecer primeiro as condições actuais (designadas por “de referência”) de recarga para os vários sistemas aquíferos. Nas condições climáticas actuais, e segundo os trabalhos de Lobo Ferreira (1991), Cruz (1992), Cruz (1997), Novo *et al.* (1997), Azevedo (1998) e Novo *et al.* (2001), os valores de recarga para as 9 ilhas dos Açores são os seguintes (Quadro XXVIII):

Quadro XXVIII – Valores de Recarga para as Ilhas dos Açores Determinados pelo Método dos Cloretos e BALSEQ, para as Condições Climáticas Actuais

Ilha			Precipitação (mm/ano)	BALSEQ		Cloretos (mm/ano)
				mm/ano	m ³ /ano	
Santa Maria	Sector W	Plataforma Ocidental	786	108,7 a 205,1 (1)	2,37x10 ⁶ a 4,47x10 ⁶ (1)	133 (2)
		Zona de Transição	922,4	337,5	8,3x10 ⁶	--
	Serra Verde		1 383	183,7	9,3x10 ⁶	--
S. Miguel	Sete Cidades caldeira		1 845	1 310,2	25,1x10 ⁶	--
	Sete Cidades vertentes		1 074 a 1568	238,2	28,3x10 ⁶	--
	Picos		1 010	602,5	116x10 ⁶	--
	Fogo vertentes		1 692	279,0	33,8x10 ⁶	--
	Fogo caldeira		2 371 (3)	1 781,4	8,1x10 ⁶	--
	Furnas caldeira		2 327	1 742,0	21,9x10 ⁶	--
	Povoação e Furnas vertentes	Furnas	1 080 a 2 060 (3)	210,0	4,1x10 ⁶	--
		Povoação	1 080 a 2 060 (3)	210,0	15,4x10 ⁶	--
Nordeste	Nordeste	1 827 a 2060 (3)	262,5	28,6x10 ⁶	--	
	Lombas	1 827 a 2060 (3)	262,5	33,0 x10 ⁶	--	
Terceira	Lajes e Santa Rita		1 171	708,0	48,3x10 ⁶	--
	Cinco Picos		1 405 a 1 975	1 110,5	76,5x10 ⁶	--
	Serra do Cume		1 762	465,0	6,9x10 ⁶	--
	Guilherme Moniz	Caldeira	2 212	1 247,1	27,1x10 ⁶	--
		vertente N	1 798	725,3	15,0x10 ⁶	--
		vertente S	1 095 a 1 919 (3)	439,3	7,5x10 ⁶	--
	Zona de Transição		1 230 a 2 473	1 358,5	91,1x10 ⁶	--
Santa Bárbara	Vertentes	928 a 2 704 (3)	567,6	49,9x10 ⁶	--	
	Caldeira	3 048 (3)	2 386,9	10,1x10 ⁶	--	
Graciosa	Plataforma		844 a 1 030	482,9	17,0x10 ⁶	--
	Serra das Fontes		1 296	646,8	3,9x10 ⁶	--
	Serra Branca/Dormida		1 018	421,7	4,5x10 ⁶	--
	Vulcão da Caldeira	Caldeira	996 (3)	534,1	4,1x10 ⁶	--
		Vertentes	863	192,9	2,0x10 ⁶	--
S. Jorge	Rosais		1 353 a 2 175 (3)	871,7	54,7x10 ⁶	--
	Manadas/Rib. Seca		1 323 a 2 973 (3)	1 050,8	69,8x10 ⁶	--
	Topo		1 454 a 2 441 (3)	570,8	61,1 x10 ⁶	--
Pico	Montanha do Pico	Zona alta	4 653 (7)	3 822,3	104,2x10 ⁶	--
		Baixa	1 083 a 1 786	844,6	214,4x10 ⁶	--
	Planalto d’Achada	Planalto	3 883	--	--	1 969 (4)
		Vertentes	1 383	541,3	63,7x10 ⁶	--

Impactos das Alterações Climáticas: Mudanças nos Regimes de Precipitação e seus Impactos sobre a Recarga de Aquíferos

Ilha		Precipitação (mm/ano)	BALSEQ		Cloreto (mm/ano)	
			mm/ano	m ³ /ano		
Faial	Região W	1 152	666,6	19,5x10 ⁶	--	
	Vulcão da Caldeira	Caldeira	2 972 a 3 075	2 365	7,8x10 ⁶	--
		Horta	1 024	424,7	4,6x10 ⁶	--
	Vertentes	1 080 a 2 593	299,2	39,6x10 ⁶	--	
Corvo	Plataforma da Vila	979	443,7	0,25x10 ⁶	--	
	Caldeirão	Caldeira	2 074 (3)	1 515,9	4,4x10 ⁶	--
		Vertentes	1 543 (3)	255,3	3,2x10 ⁶	--
Flores	Domínios I e II	1 873	215,3	18,3x10 ⁶ (5)	--	
	Domínio III	2 538	1 117	64,8x10 ⁶ (5)	--	
	Globalidade da Ilha	2 033	581,1	83,1x10 ⁶ (5)	712 (6)	

(1) balanço hídrico diário (a partir de CEGEVAP do Dr. Costa Almeida – Fac. Ciências da Universidade de Lisboa – e BALSEQ); (2) o método dos cloretos aponta para valores de 2,9x10⁶ m³/ano; (3) valores médios a partir das equações de AGOSTINHO (1938); (4) o método dos cloretos aponta para valores de 93,76x10⁶ m³/ano; (5) balanço hídrico ao nível do substrato sub-superficial; (6) o método dos cloretos aponta para valores de 101,8x10⁶ m³/ano, ou seja cerca de 35% da precipitação; valor admitido por Cruz (1997) para a cota de 1 000 m.

Considerando agora as modificações na precipitação e na evapotranspiração admitidas para os vários cenários de alteração climática, expostos nos capítulos anteriores, e as tendências de evolução de recarga calculadas para esses cenários (Quadros XII, XIV, XX, XXII, XIV), assim como os valores da recarga para as condições actuais (cf. Quadro XXVIII), calcularam-se para os vários aquíferos da ilha Terceira as recargas em cada um destes cenários de alteração. Tais recargas por cenário de alteração da precipitação e/ou da evapotranspiração são apresentadas nos Quadros XXIX, XXX, XXXI, XXXII, XXXIII. Esta extensão aos vários aquíferos da Terceira pôde ser realizada porque existem similitudes de coberto vegetal e de litologias/solos entre as várias regiões da ilha e as diferentes zonas de solo/coberto vegetal da área alargada do Cabrito, onde se aplicou o modelo em pormenor. O cálculo destas recargas modificadas por cenário de precipitação/evapotranspiração, para cada sistema aquífero, fez-se aplicando ao valor actual de recarga por sistema aquífero, a variação média de recarga para cada cenário; por exemplo, para o cenário de +6% de precipitação, a variação média de recarga é de 5,9% (cf. Quadro XIV), e estes 5,9% foram usados como factor multiplicativo sobre a recarga actual de cada sistema aquífero para calcular a nova recarga sob as novas condições climáticas (subida da precipitação de +6%).

Idealmente, o que deveria fazer-se era a aplicação do factor de variação de recarga para cada tipo de solo e de coberto vegetal por aquífero, definindo diferentes zonas de recarga; porém, tal exigiria não só uma detalhada cartografia dos tipos de solo – sobretudo das suas características hidráulicas – e do tipo de ocupação vegetal, como também, para ser absolutamente correcto, o zonamento da recarga por aquífero nas condições actuais. Nenhuma informação deste tipo era conhecida à data da realização deste trabalho e muito em especial o zonamento espacial da recarga por aquífero, sendo apenas conhecidos os valores globais calculados de recarga. Assim teve de se proceder a uma simplificação da análise, sabendo que se perderia alguma representatividade da variação do sistema, dado não ser possível uma melhor aproximação à realidade com a informação existente; deste modo, em vez de uma avaliação zonada e baseada em critérios de variação local ponderada de solos e vegetação, optou-se por aplicar uma variação média por cenário, que integrasse os vários tipos de solos e vegetação ocorrentes globalmente em cada sistema aquífero.

Impactos das Alterações Climáticas: Mudanças nos Regimes de Precipitação e seus Impactos sobre a Recarga de Aquíferos

A extensão das projecções das variações da recarga dos diversos cenários para as zonas declivosas (ex.: vertentes do maciço de Santa Bárbara), que têm de facto recargas muito baixas mas não nulas se comparadas com as restantes regiões da ilha Terceira (cf. Quadro XXVIII), baseou-se no facto da recarga para estas regiões já ter sido calculada em trabalhos anteriores (Novo *et al.*, 2001), com o mesmo modelo BALSEQ. Assim, e apesar destas zonas serem dominadas pelo escoamento superficial, apesar do modelo BALSEQ não ter sido usado para calcular em efectivo pormenor a sua recarga para os cenários de alteração da precipitação e evapotranspiração, considerou-se de interesse avaliar em que intervalos de valores poderia a recarga nestas zonas variar para os diferentes cenários considerados. Teve de se realizar a mesma abordagem simplificada referida no parágrafo anterior, pelas mesmas razões, embora se considere a necessidade de trabalhos futuros para uma avaliação das variações da recarga em diferentes cenários de alteração climática, mais focalizada nestas regiões de alto declive mas onde alguma infiltração ocorre⁷¹, e que necessitará de um zonamento cartográfico pormenorizado dos tipos de solos (sobretudo das suas propriedades hidráulicas) e respectivo coberto vegetal.

Quadro XXIX – Valores de Recarga para a Ilha Terceira Determinados pelo Método do BALSEQ, para Diferentes Cenários de Alterações Climáticas (Subida de Precipitação)

Sistema Aquífero		Cenários de Subida da Precipitação e Recargas (mm/ano)						
		RAQ = +5,9%	RAQ = + 10,9%	RAQ = +14,9%	RAQ = +21,1%	RAQ = +26,3%	RAQ = +31,5%	RAQ = +11,9%
Lajes e Santa Rita		749,77	785,17	813,49	857,39	894,20	931,02	792,25
Cinco Picos		1176,02	1231,54	1275,96	1344,82	1402,56	1460,31	1242,65
Serra do Cume		492,44	515,69	534,29	563,12	587,30	611,48	520,34
Guilherme Moniz	Caldeira	1320,68	1383,03	1432,92	1510,24	1575,09	1639,94	1395,50
	Vertente N	768,09	804,36	833,37	878,34	916,05	953,77	811,61
	Vertente S	465,22	487,18	504,76	531,99	554,84	577,68	491,58
Zona de Transição		1438,65	1506,58	1560,92	1645,14	1715,79	1786,43	1520,16
Santa Bárbara	Vertentes	601,09	629,47	652,17	687,36	716,88	746,39	635,14
	Caldeira	2527,73	2647,07	2742,55	2890,54	3014,65	3138,77	2670,94

⁷¹ Assim como a existência de pequenos aquíferos.

Quadro XXX – Valores de Recarga para a Ilha Terceira Determinados pelo Método do BALSEQ, para Diferentes Cenários de Alterações Climáticas (Descida de Precipitação)

Sistema Aquífero	Cenários de Descida da Precipitação e Recargas (mm/ano)									
	RAQ = -3,7%	RAQ = -6,0%	RAQ = -11,7%	RAQ = -17,2%	RAQ = -23,1%	RAQ = -17,2%	RAQ = -30,8%	RAQ = -6,5%	RAQ = -20,2%	
Lajes e Santa Rita	681,80	665,52	625,16	586,22	544,45	586,22	489,94	661,98	564,98	
Cinco Picos	1069,41	1043,87	980,57	919,49	853,97	919,49	768,47	1038,32	886,18	
Serra do Cume	447,80	437,10	410,60	385,02	357,59	385,02	321,78	434,78	371,07	
Guilherme Moniz	Caldeira	1200,96	1172,27	1101,19	1032,60	959,02	1032,60	862,99	1166,04	995,19
	Vertente N	698,46	681,78	640,44	600,55	557,76	600,55	501,91	678,16	578,79
	Vertente S	423,05	412,94	387,90	363,74	337,82	363,74	304,00	410,75	350,56
Zona de Transição	1308,24	1276,99	1199,56	1124,84	1044,69	1124,84	940,08	1270,20	1084,08	
Santa Bárbara	Vertentes	546,60	533,54	501,19	469,97	436,48	469,97	392,78	530,71	452,94
	Caldeira	2298,58	2243,69	2107,63	1976,35	1835,53	1976,35	1651,73	2231,75	1904,75

Quadro XXXI – Valores de Recarga para a Ilha Terceira Determinados pelo Método do BALSEQ, para Diferentes Cenários de Alterações Climáticas (Subida da Evapotranspiração)

Sistema Aquífero	Cenários de Subida da Evapotranspiração e Descida das Recargas (mm/ano)									
	RAQ = -0,6%	RAQ = -2,1%	RAQ = -4,0%	RAQ = -5,9%	RAQ = -7,4%	RAQ = -9,2%	RAQ = -10,7%	RAQ = -13,6%	RAQ = -16,4%	
Lajes e Santa Rita	665,52	693,13	679,68	666,23	655,61	642,86	632,24	611,71	591,89	
Cinco Picos	1043,87	1087,18	1066,08	1044,98	1028,32	1008,33	991,68	959,47	928,38	
Serra do Cume	437,10	455,24	446,40	437,57	430,59	422,22	415,25	401,76	388,74	
Guilherme Moniz	Caldeira	1172,27	1220,91	1197,22	1173,52	1154,81	1132,37	1113,66	1077,49	1042,58
	Vertente N	681,78	710,07	696,29	682,51	671,63	658,57	647,69	626,66	606,35
	Vertente S	412,94	430,07	421,73	413,38	406,79	398,88	392,29	379,56	367,25
Zona de Transição	1276,99	1329,97	1304,16	1278,35	1257,97	1233,52	1213,14	1173,74	1135,71	
Santa Bárbara	Vertentes	533,54	555,68	544,90	534,11	525,60	515,38	506,87	490,41	474,51
	Caldeira	2243,69	2336,78	2291,42	2246,07	2210,27	2167,31	2131,50	2062,28	1995,45

Quadro XXXII – Valores de Recarga para a Ilha Terceira Determinados pelo Método do BALSEQ, para Diferentes Cenários de Alterações Climáticas (Descida da Evapotranspiração)

Sistema Aquífero	Cenários de Descida da Evapotranspiração e Subida das Recargas (mm/ano)						
	RAQ = +2,2%	RAQ = +4,4%	RAQ = +6,8%	RAQ = +9,2%	RAQ = +11,7%	RAQ = +14,2%	
Lajes e Santa Rita	723,58	739,15	756,14	773,14	790,84	808,54	
Cinco Picos	1134,93	1159,36	1186,01	1212,67	1240,43	1268,19	
Serra do Cume	475,23	485,46	496,62	507,78	519,41	531,03	
Guilherme Moniz	Caldeira	1274,54	1301,97	1331,90	1361,83	1393,01	1424,19
	Vertente N	741,26	757,21	774,62	792,03	810,16	828,29
	Vertente S	448,96	458,63	469,17	479,72	490,70	501,68
Zona de Transição	1388,39	1418,27	1450,88	1483,48	1517,44	1551,41	
Santa Bárbara	Vertentes	580,09	592,57	606,20	619,82	634,01	648,20
	Caldeira	2439,41	2491,92	2549,21	2606,49	2666,17	2725,84

Quadro XXXIII – Valores de Recarga para a Ilha Terceira Determinados pelo Método do BALSEQ, para Diferentes Cenários de Alterações Climáticas (Variação da Precipitação e Evapotranspiração)

Sistema Aquífero		Cenários de Subida da Precipitação, Subida da Evapotranspiração e Subida das Recargas (mm/ano)	
		RAQ = +5,3%	
Lajes e Santa Rita		745,52	
Cinco Picos		1169,36	
Serra do Cume		489,65	
Guilherme Moniz	Caldeira	1313,20	
	Vertente N	763,74	
	Vertente S	462,58	
Zona de Transição		1430,50	
Santa Bárbara	Vertentes	597,68	
	Caldeira	2513,41	

6. ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS INTRÍNSECAS DOS VÁRIOS SISTEMAS HIDROGEOLÓGICOS INSULARES E SUA RESPOSTA ÀS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS

Neste capítulo pretende-se definir como as características intrínsecas dos materiais aquíferos podem afectar a sua resposta às alterações climáticas. Assim começa-se por resumir o que se conhece quanto às características gerais de idade, génese, litologias, propriedades hidráulicas e funcionamento dos aquíferos da ilha Terceira, seguindo-se a definição, com base nestas propriedades, das susceptibilidades dos aquíferos à estiagem, intrusão salina e outros impactos das alterações climáticas. A partir desta base procura-se identificar as regiões onde se verifique, para os vários cenários de alteração climática, modificações nos volumes de infiltração, escoamento superficial, etc.

Começou-se assim por tentar compreender o modo como as várias propriedades dos materiais constituintes dos sistemas aquíferos relacionáveis com a permeabilidade – estrutura, idade, volume de tubos de lava e/ou zonas de brecha, grau de alteração, porosidade, litologia, tipo de génese – podem responder às alterações climáticas em termos de funcionamento hidrogeológico, por forma a definir quais destas propriedades apresentam um maior controlo da resposta do funcionamento dos aquíferos às alterações climáticas. Com base nesta informação definiram-se igualmente as regiões onde, para os vários cenários de alteração climática, possam ocorrer as mais significativas alterações do comportamento hidrogeológico. Este conhecimento é necessário para a avaliação da vulnerabilidade às alterações climáticas, tema que será desenvolvido no Capítulo 13.

As características conhecidas dos aquíferos foram definidas no Plano Regional da Água dos Açores (DROTRH e IA, 2001), em Novo *et al.* (2001) e nas várias teses de doutoramento e mestrado na área de hidrogeologia que se têm realizado sobre os Açores. Por forma a poder integrar a informação dos vários trabalhos, apresenta-se no Anexo 2 uma correlação entre a nomenclatura dos aquíferos utilizada no Plano Regional da Água dos Açores, e que no presente trabalho é a adoptada, e a de Novo *et al.* (2001).

6.1. Caracterização Geral dos Sistemas Hidrogeológicos da Ilha Terceira Quanto à sua Génese e Idade

A idade é um importante indicador, embora não necessariamente linear, directo, do estado de alteração de uma formação geológica; indirectamente, em função do tipo de litologia, a idade pode ser correlacionada com a permeabilidade dos materiais. A génese do tipo de sistemas hidrogeológicos está associada ao tipo de litologias e em larga medida também à estrutura das formações, sendo esta última um dos factores determinantes no estabelecimento dos percursos de circulação das águas subterrâneas nos aquíferos dos Açores. A caracterização dos sistemas hidrogeológicos para a ilha Terceira, apresenta-se no Quadro XXXIV.

Quadro XXXIV – Caracterização dos Sistemas Hidrogeológicos da Ilha Terceira Quanto a Génese e Idade

Sistema Aquífero (DROTRH e IA, 2001) (A)		Idade (anos) (*)	Área (km ²)	Génese (*)
Serra de Santiago		19 mil	4,91	Explosivo predominante
Grabem		Formação Ignimbrítica das Lajes – 18 a 19 mil; Formação Traquibasáltica dos Cinco Picos > 23 mil; Formações Basálticas Inferiores e Formações Ignimbríticas Inferiores ≥ 23 mil (mais jovens que Traquibasaltos dos Cinco Picos)	17,57	Efusivo e Explosivo
Ignimbritos das Lajes		Formação Ignimbrítica das Lajes – 18 mil a 19 mil	33,46	Explosivo
Serra do Cume		Formação Ignimbrítica das Lajes - 19 mil; Formação Traquibasáltica dos Cinco Picos > 23 mil	23,39	Efusivo e Explosivo
Ribeirinha		Formação Traquibasáltica Cinco Picos > 23 mil; Basaltos Inferiores > 23 mil; Formação Ignimbrítica de Angra ≈ 23,1 mil	9,45	Efusivo predominante
Guilherme Moniz-São Sebastião	Sector Cinco Picos	Formação Traquibasáltica Cinco Picos > 23 mil; Basaltos Inferiores > 23 mil; Formação Ignimbrítica das Lajes > 19 mil	78,13	Efusivo predominante
	Sector Cabrito	Formação Basáltica Superior ≈ 2 mil; Formação Traquítica de Guilherme Moniz > 20 mil (mais recente que Formação Traquibasáltica de Cinco Picos)		Efusivo
Central		Formação Traquítica de Guilherme Moniz > 23 mil; Formação Ignimbrítica Angra ≈ 23 mil; Formações Peralcalinas Pico Alto, < 18,6 mil	24,28	Efusivo e Explosivo
Labaçal-Quatro Ribeiras		Formações Traquíticas de Guilherme Moniz > 20 mil; Formação Ignimbrítica de Angra ≈ 23,1 mil; Formação Ignimbrítica das Lajes ≈ 18 mil; Formações Peralcalinas de Pico Alto < 18,6 mil; Brecha Biscoitos < 18,6 mil; Basaltos Superiores < 23,1 mil	52,67	Efusivo e Explosivo
Biscoitos-Terra Chã		Formação Traquibasáltica Cinco Picos > 23 mil; Formação Basáltica Santa Bárbara ≈ 25 mil; Formação Traquítica Guilherme Moniz > 20 mil; Formações Basálticas Inferiores ≥ 23 mil; Formação dos Basaltos Superiores < 23,1 mil; materiais actuais ≈ 0	57,99	Efusivo
Santa Bárbara Superior		Traquitos das vertentes, pós-caldeira < 18,6 mil	16,85	Efusivo

Análise das Características Intínsecas dos Vários Sistemas Hidrogeológicos Insulares e sua Resposta à Alterações Climáticas

Sistema Aquífero (DROTRH e IA, 2001) (A)	Idade (anos) (*)	Área (km ²)	Gênese (*)
Santa Bárbara Inferior	Depósitos de turfeira ≈ 0; Formação Basáltica de Santa Bárbara (substrato basal) ≈ 25 mil; Formação Peralcalina do Pico Alto: (1) piroclastos pós-caldeira < 23 mil; (2) formações do interior da caldeira, pós-caldeira < 25 mil	84,75	Efusivo predominante
<i>Aquífero de base de Novo et al., (2001), não individualizado em DROTRH e IA (2001)</i>	Formação Traquibasáltica Cinco Picos > 23 mil; Formação Basáltica Santa Bárbara ≈ 25 mil; Formação Traquítica Guilherme Moniz > 20 mil; Formações Basálticas Inferiores e Formações Ignimbríticas Inferiores ≥ 23 mil; Formação Ignimbrítica de Angra ≈ 23,1 mil; Formação dos Basaltos Superiores < 23,1 mil; materiais actuais ≈ 0	403,45	Efusivo e Explosivo

(*) Idades e géneses definidas em: Self e Gunn (1976), Self (1976), Rodrigues (1993), Lloyd e Collis (1981), Rodrigues (2002 a)

Para o quadro acima utilizou-se a classificação dos aquíferos conforme a DRAOTH e IA (2002), as idades foram obtidas dos trabalhos de Self e Gunn (1976), Self (1976), Rodrigues (1993), Lloyd e Collis (1981) e a informação relativa à gênese das formações foi obtida dos trabalhos de Rodrigues (1993) e Menezes (1993).

Refira-se que Rodrigues (2000), ao fazer a caracterização hidrogeológica dos sistemas aquíferos da ilha Terceira, subdividiu dois dos três maciços vulcânicos da ilha num conjunto de sistemas aquíferos superiores e inferiores, definindo 7 aquíferos superiores e 3 inferiores no sector de Guilherme Moniz e 5 aquíferos superiores e 8 inferiores no sector dos Cinco Picos, como se expressa no Quadro XXXV. A excepção é o maciço de Santa Bárbara, cujos aquíferos foram divididos em Pomíticos (5 sistemas aquíferos) e Peralcalinos (3 sistemas aquíferos); todos estes aquíferos são superficiais, considerando Rodrigues (2005, comunicação oral) que apenas o aquífero de base é não superficial. Cruzando a classificação de Rodrigues (2002 a) com a de DRAOTH e IA (2002) e com a localização dos vários aquíferos do maciço de Santa Bárbara, verifica-se que o sistema aquífero Santa Bárbara Superior (DRAOTH e IA, 2002) possui aquíferos pomíticos e peralcalinos superficiais, e que o sistema aquífero Santa Bárbara Inferior possui aquíferos pomíticos mais profundos.

Quadro XXXV – Aquíferos da Ilha Terceira (adaptado de Rodrigues, 2002 a)

Maciço Vulcânico	Família Aquífera	Sistema Aquífero	Formações Aquíferas
Cinco Picos	Superior	Lajes 1	Ignimbritos das Lajes; depósitos de vertente; Traquibasaltos Cinco Picos
		Cume 1	Depósitos pomíticos
		Cinco Picos 1	Basaltos inferiores
		S. Sebastião	Depósitos freatovulcânicos
		Ribeirinha 1	Escórias e <i>lappilli</i>
	Inferior	Santiago	Traquibasaltos dos Cinco Picos
		Lajes 2	Traquibasaltos dos Cinco Picos
		Cume 2	Traquibasaltos dos Cinco Picos
		Cinco Picos 2	Traquibasaltos dos Cinco Picos
		Cinco Picos 3	Traquibasaltos dos Cinco Picos
		Ribeira Seca	Traquibasaltos dos Cinco Picos
		Ladeira Grande	Traquibasaltos dos Cinco Picos
		Ribeirinha 2	Traquibasaltos dos Cinco Picos
Guilherme Moniz	Superior	Aqualva 1	Formações Peralcalinas do Pico Alto; Depósitos piroclásticos
		Quatro Ribeiras	Formações Peralcalinas do Pico Alto
		Tombo	Formações Peralcalinas do Pico Alto; Depósitos piroclásticos
		Aqualva 2	Basaltos superiores
		Cabrito	Basaltos superiores
		S. Rafael	Ignimbritos das Lajes
		Fonte da Telha	Depósitos piroclásticos
	Inferior	Alagoa	Traquitos de Guilherme Moniz
		Nasce Água 1	Desconhecido
		Nasce Água 2	Traquitos de Guilherme Moniz
Santa Bárbara	Pomíticos	Santa Bárbara	Depósitos pomíticos
		Doze Ribeiras	Depósitos pomíticos
		Serreta	Depósitos pomíticos
		Raminho	Depósitos pomíticos
		Altares	Depósitos pomíticos
	Peralcalinos	Cales	Formações Peralcalinas de Sta. Bárbara
		Ribeira dos Gatos	Formações Peralcalinas de Sta. Bárbara
		Biscoitos da Fajã	Formações Peralcalinas de Sta. Bárbara

6.2. Caracterização Geral dos Sistemas Hidrogeológicos da Ilha Terceira Quanto às suas Propriedades Hidráulicas

A caracterização destes sistemas baseia-se em Novo *et al.* (2001) e DROTRH e IA (2001), nela se fazendo uma breve resenha do que se conhece relativamente às litologias, seus parâmetros hidráulicos e produtividades associadas às nascentes e/ou outros pontos de água. Relativamente à ilha Terceira, esta caracterização define que as propriedades hidráulicas dos aquíferos são as seguintes (Quadro XXXVI), conforme aos valores apresentados em DROTRH e IA (2001):

Quadro XXXVI – Propriedades Hidráulicas Conhecidas dos Aquíferos da Ilha Terceira (DROTRH e IA, 2001; Novo *et al.*; 2001)

Sistema Aquífero (DROTRH e IA, 2001)		K (m/dia)	T (m ² /dia)	q (L/(s.m))	P (%)
Serra de Santiago		moderada	--	--	11 – 20
Graben		731 - 732	7 379 – 7 906	70 - 75	3 – 6
Ignimbritos das Lajes		124	1 391 – 17 571	13 - 167	11 – 21
Serra do Cume		moderada	--	--	--
Ribeirinha		moderada	--	--	3 – 6
Guilherme Moniz-São Sebastião	Sector Cinco Picos	5 713	752 – 11 425	7 - 112	3 – 8
	Sector Cabrito	--	150 - 300	--	6 – 35 (1)
Central		19 - 33	115 - 432	1 - 4	3 – 29
Labaçal-Quatro Ribeiras		alta	--	--	3 – 9
Biscoitos-Terra Chã		121	878	8	6 – 9
Santa Bárbara Superior		--	--	--	--
Santa Bárbara Inferior		--	--	--	--

*K = permeabilidade; T = transmissividade; q = caudal específico; P = porosidade; S = coef. armazenamento; (1) porosidade eficaz avaliada entre 8 a 10%; os valores numéricos de K, T e q deste quadro são retirados de DROTRH e IA (2001).

Os caudais, caudais instantâneos e produtividades anuais são apresentados em Novo *et al.* (2001). Desta informação pode verificar-se que os sistemas aquíferos na ilha Terceira têm uma grande amplitude de valores de permeabilidades e transmissividades, com formações onde a circulação tem uma velocidade moderada e outras onde esta é muito rápida, pelo que, se no caso de pequenos níveis aquíferos suspensos, estes sofrem um esgotamento bastante rápido. Um destes exemplos é o caso do Cabrito, cujo tempo de permanência é da ordem de 11 a 33 dias (Novo *et al.*, 1997). Exceptuando os sistemas do Ignimbrito das Lajes e Graben, a maioria das formações aquíferas nos restantes sistemas aquíferos são pequenos níveis produtivos suspensos, delimitados pela fracturação, topografia e/ou dimensão das escoadas (ex.: escoadas basálticas recentes, no geral associadas a pequenas chaminés adventícias, que alimentam as nascentes do maciço de Santa Bárbara), o que se reflecte no regime das nascentes que alimentam, as quais sofrem ao longo do ano grandes variações no seu caudal, chegando algumas a secar. Por exemplo, mesmo as nascentes do Cabrito, que são permanentes ao longo de todo o ano e são das principais fontes de abastecimento para Angra do Heroísmo, registam variações de caudal ao longo do ano de até 2 ordens de magnitude (Novo *et al.*, 1997). No Quadro XXXVII é dada uma imagem resumida da variabilidade de produtividades na ilha Terceira.

Os caudais apresentados são os caudais medidos num dado instante à boca da nascente. Por aquífero, considerou-se o caudal mínimo registado, medido na nascente de menor caudal conhecido, e o caudal máximo registado na nascente de maior caudal conhecido, por forma a dar o leque de variação das produtividades em cada aquífero.

Quadro XXXVII – Produtividades Conhecidas dos Aquíferos da Ilha Terceira

Sistema Aquífero (DROTRH e IA, 2001)	Q Instantâneo (l/s) (Novo <i>et al.</i>, 2001)	
Serra de Santiago	0,023 *	
Graben	0,023 – 19,2	
Ignimbritos das Lajes	0,012 – 4,7	
Serra do Cume	0,012 – 1,065	
Ribeirinha	--	
Guilherme Moniz- São Sebastião	Sector Cinco Picos Sector Cabrito	4,6 – 10 3,7 – 478
Central	5 – 226	
Labaçal-Quatro Ribeiras	0,013 – 7,52	
Biscoitos-Terra Chã	15 – 20	
Santa Bárbara Superior	--	
Santa Bárbara Inferior	--	

*apenas uma observação

Assim, a dependência absoluta dos regimes de chuvas⁷², a reduzida dimensão da maioria dos aquíferos, a rápida circulação e esgotamento em muitos deles, e o baixo coeficiente de armazenamento levam a que estes aquíferos possam ser mui vulneráveis a quaisquer alterações no clima, muito em especial às alterações das entradas de água no sistema subterrâneo (via precipitação). Sinal desta susceptibilidade dá-se em DROTRH e IA (2001), onde se refere a rápida e constante descida dos níveis freáticos ao longo do ano hidrológico (devido quer a sobreexploração quer ao funcionamento hidrodinâmico dos sistemas aquíferos, incluindo as descargas para o meio oceânico) e os curtos tempos de residência das águas na maioria dos aquíferos, sobretudo quando comparados com os aquíferos continentais.

6.3. Caracterização Geral dos Sistemas Hidrogeológicos da Ilha Terceira Quanto ao seu Funcionamento Hidrogeológico

Na análise das propriedades intrínsecas dos vários sistemas hidrogeológicos com vista à compreensão da sua resposta hidrogeológica às variações climáticas, é necessário realizar um zonamento que identifique quais as zonas potencialmente mais ou menos permeáveis no actual quadro climático. Este trabalho já foi em larga medida realizado por Azevedo *et al.* (1986), Rodrigues (1993), Novo *et al.* (2001), DROTRH e IA (2001), Rodrigues (2002) e outros autores onde, considerando as litologias, idade, alteração e tectónica (que controlam a permeabilidade das formações e os padrões de circulação das águas subterrâneas), a geomorfologia (determina a importância da infiltração e escoamento superficial além de influenciar na precipitação – a precipitação nos Açores tem um controlo predominantemente orográfico – e portanto na quantidade de água disponível no sistema), dados das campanhas de inventário e outra informação

⁷² Nas ilhas os aquíferos não podem ser abastecidos (via um qualquer tipo de contacto hidráulico) a partir de grandes sistemas aquíferos regionais que transportam a água por vezes de longas distâncias; os aquíferos insulares têm de receber recarga em exclusivo das chuvas que caem numa pequena área, normalmente a área do próprio aquífero ou, no máximo, a área da ilha.

dispersa, se efectuou o seguinte zonamento hidrogeológico para a Ilha Terceira (Quadro XXXVIII; cf. Azevedo *et al.*, 1986):

1. **regiões de escoamento superficial elevado** - zonas de infiltração subordinada ao escoamento superficial. São muitas vezes áreas de relevo acentuado, cobertas por materiais menos permeáveis. No entanto podem albergar unidades produtivas suspensas e/ou de base.
2. **regiões de escoamento superficial intermédio** - regiões onde ocorre escoamento superficial sem que contudo se deixe de verificar infiltração⁷³. São zonas tipicamente de sucessões litológicas complexas, com alternâncias de unidades permeáveis e depósitos semi a impermeáveis. Além de uma unidade hidrogeológica de base existem diversas unidades produtivas suspensas cuja importância, variável, pode por vezes ultrapassar a da unidade hidrogeológica de base (ex.: o sistema aquífero Central, ilha Terceira).
3. **regiões de escoamento superficial baixo** - regiões onde a rede de drenagem é inexistente, desorganizada, endorreica e/ou de densidade moderada a baixa. O relevo pode ser aplanado (embora no caso de lavas muito permeáveis este possa ter declives moderados a elevados), com ou sem micro-relevo intenso.
 - 3.1. **regiões de infiltração dominante para a unidade hidrogeológica de base** - áreas que pelas suas cotas e/ou características geológicas permitem que a infiltração atinja directamente a unidade hidrogeológica de base.
 - **zonas de infiltração em escoadas lávicas e depósitos piroclásticos recentes** - zonas onde o escoamento superficial é diminuto independentemente da topografia ser ou não muito declivosa, as linhas de água existentes frequentemente desaparecem para o interior das lavas, há quase total ausência de nascentes, dominam as escoadas lávicas muito porosas e frequentemente cavernosas, no geral basálticas, as unidades piroclásticas são em volume e/ou área reduzida. A unidade produtiva existente é praticamente apenas a basal.
 - **zonas de infiltração em escoadas lávicas e depósitos piroclásticos** - são no geral zonas aplanadas, com diminuta a ausente rede de drenagem, nascentes em número diminuto ou ausentes. A infiltração deve-se não apenas à permeabilidade elevada mas também às condicionantes geomorfológicas que favorecem este processo. As litologias são variáveis, incluindo derrames lávicos e depósitos piroclásticos de naturezas variadas. A unidade produtiva preponderante a única é a basal.
 - **zonas de infiltração em plataformas de baixa altitude** - são geralmente zonas aplanadas, situadas a baixa altitude (ex.: plataformas de fajãs) cuja elevada permeabilidade permite uma infiltração acentuada. Devido à sua cota altimétrica a infiltração ocorre unicamente para a unidade hidrogeológica de base.
 - **caldeiras como zonas de infiltração** - as caldeiras com drenagem endorreica ou com lagoas que não extravasam para o exterior e cuja

⁷³ Esta é uma avaliação qualitativa, baseada na densidade de drenagem.

infiltração das águas acumuladas não alimenta unidades produtivas suspensas.

3.2. *regiões de infiltração dominante para as unidades produtivas suspensas*

- regiões onde a infiltração é interceptada por unidades produtivas suspensas antes de atingir a unidade hidrogeológica de base. São regiões de características geomorfológicas mui variáveis mas tendo em comum densidades de drenagem superficial reduzida e uma cobertura de materiais muito permeáveis, que alternam em profundidade com níveis aquíferos, a que se associam por vezes turfeiras e lagoas (perenes ou sazonais).

- *zonas de infiltração em escoadas lávicas e depósitos piroclásticos recentes* - zonas onde o escoamento superficial é diminuto, o micro-relevo tende a ser acentuado, as linhas de água existentes frequentemente desaparecem para o interior das lavas, quase total ausência de nascentes, dominam as escoadas lávicas muito porosas e frequentemente cavernosas, no geral basálticas, as unidades piroclásticas pouco permeáveis são em volume e/ou área reduzida.
- *zonas de infiltração em escoadas lávicas e depósitos piroclásticos* - são no geral zonas aplanadas em altitude ou de declives pouco acentuados, com uma diminuta a ausente rede de drenagem, nascentes em número diminuto ou ausentes. A infiltração deve-se não apenas à permeabilidade elevada mas também às condicionantes geomorfológicas que favorecem este processo. As litologias são variáveis, incluindo derrames lávicos e depósitos piroclásticos de naturezas diversificadas.
- *caldeiras como zonas de infiltração* - as caldeiras que não possuam qualquer drenagem superficial, onde existe uma rede de drenagem endorreica ou em que ocorrem lagoas que tenham contacto com unidades produtivas subjacentes. São no geral caracterizadas por serem áreas aplanadas e limitadas ao interior das caldeiras podendo, no caso de não estarem ocupadas por lagoas permanentes⁷⁴, apresentarem um micro-relevo elevado. As unidades produtivas que são recarregadas por estas estruturas são unidades produtivas suspensas que tendem a apresentar as suas áreas de descarga nos bordos da caldeira, podendo também descarregar para unidades produtivas subjacentes. Estão fora deste grupo as caldeiras com fundos impermeáveis.

⁷⁴ Nestes casos, quando se formam lagoas, na sequência dos eventos de precipitação, estas tendem a esvaziar-se rapidamente (ex.: lagoa da Caldeira, ilha do Faial). O regime destas lagoas temporárias (ou mesmo das permanentes) pode ser alterado por eventos sísmicos.

Quadro XXXVIII – Zonamento Hidrogeológico da Ilha Terceira

Região da Ilha		Zona Hidrogeológica	Sub-Zona Hidrogeológica
Cinco Picos	Graben	Escoamento superficial baixo	Infiltração para as unidades produtivas suspensas em lavas e piroclastos
	Cinco Picos	Escoamento superficial baixo	Infiltração para as unidades produtivas suspensas em lavas e piroclastos
	Serras do Cume, Ribeirinha, Santiago	Escoamento superficial baixo	Infiltração para as unidades produtivas suspensas em lavas e piroclastos
Guilherme Moniz/Pico Alto	Maciço	Escoamento superficial intermédio	Infiltração para as unidades produtivas suspensas em lavas e piroclastos
	Caldeira	Escoamento superficial baixo	Infiltração para as unidades produtivas suspensas a partir de caldeiras
Zona de Transição		Escoamento superficial baixo	Infiltração para o “aquífero” de base em lavas e piroclastos
Santa Bárbara		Escoamento superficial elevado	--

Na avaliação da resposta dos aquíferos às alterações nos regimes de precipitação, em termos de infiltração/recarga versus escoamento superficial, um dos parâmetros mais importantes a considerar é a permeabilidade das formações aquíferas e a capacidade de infiltração dos solos, dado que estas controlam a infiltração e recarga de aquíferos. Por seu lado, em termos de armazenamento, a porosidade eficaz conjugada com o volume total do aquífero são os parâmetros que mais importam para avaliar a susceptibilidade dos aquíferos às alterações climáticas, em especial à estiagem. O estado global de alteração das formações influencia directamente a sua permeabilidade (assim como a sua porosidade eficaz). A partir da informação obtida das diversas cartas geológicas e teses de mestrado e doutoramento da Universidade dos Açores – Lloyd e Collis (1981), Rodrigues (1993), Rodrigues (2002 a) Self e Gunn (1976), Self (1976) – obteve-se uma caracterização da idade e grau de alteração associado às formações dos diversos sistemas aquíferos, que se resume para a ilha Terceira (Quadro XXXIX):

Quadro XXXIX – Idades e Estados de Alteração dos Principais Sistemas/Unidades Hidrogeológicas da Ilha Terceira

Região da Ilha/Sistemas Aquíferos (1)		Idade (10 ³ anos)	Estado Global de Alteração
Serra do Cume	Serra do Cume	≈ 23 a 19	Mediana a Pouco Alterado
Serra da Ribeirinha	Ribeirinha	≈ 23	Mediana a Pouco Alterado
Lajes	Graben	≈ 23 a 19	Mediana a Pouco Alterado
	Ignimbritos das Lajes	18	Pouco Alterado
Serra de Santiago	Serra de Santiago	19	Pouco Alterado
Guilherme Moniz-Pico Alto; Cinco Picos	Caldeira Guilherme Moniz-São Sebastião	20 a 2	Muito Pouco a Pouco Alterado
	Central	> 23 a 18,6	Mediana a Pouco Alterado
	Labaçal-Quatro Ribeiras	23 a 18	Pouco Alterado
Zona Transição	Biscoitos-Terra Chã	≈ 25 a 0	Muito Pouco a Pouco Alterado
Santa Bárbara	Santa Bárbara Superior	≈ 18,6	Pouco Alterado
	Santa Bárbara Inferior	≈ 25	Pouco Alterado

(1) Menezes (1993), Rodrigues (1993), Novo *et al.* (2001).

Considerando critérios geomorfológicos como a topografia e a densidade de drenagem (Novo *et al.*, 2001), o tipo de formações geológicas e as condutividades

Análise das Características Intínsecas dos Vários Sistemas Hidrogeológicos Insulares e sua Resposta à Alterações Climáticas

hidráulicas médias respectivas referidas na literatura (Custodio e Llamas, 1983; Cruz, 1997; Rodrigues, 2002), o grau de alteração, a informação disponível no Plano Regional da Água dos Açores (DROTRH e IA, 2001) sobre as características hidráulicas dos aquíferos açorianos, e tomando em especial atenção as características hidráulicas, obteve-se, por cruzamento de toda esta informação, o zonamento da permeabilidade para a ilha Terceira (Quadro XL):

Quadro XL – Permeabilidade Média das Regiões Hidrogeológicas da Ilha Terceira com Base em Critérios Geomorfológicos e Informação do Plano Regional da Água dos Açores

Região da Ilha/Sistemas Aquíferos		Permeabilidade
Segundo Novo <i>et al.</i> (2001)	Segundo DROTRH e IA (2001)	
Serra do Cume	Serra do Cume	Permeável a pouco permeável
Serra da Ribeirinha	Ribeirinha	Permeável a muito permeável
Lajes	Grabén	Muito Permeável
	Ignimbritos das Lajes	Muito Permeável
Serra de Santiago	Serra de Santiago	Permeável a muito permeável
Guilherme Moniz-Pico Alto; Cinco Picos	Caldeira Guilherme Moniz-São Sebastião	Muitíssimo permeável
	Central	Permeável
	Labçal-Quatro Ribeiras	Permeável a muito permeável
Zona de Transição	Biscoitos-Terra Chã	Muito permeável
Santa Bárbara	Santa Bárbara Superior	Muito permeável
	Santa Bárbara Inferior	Permeável

Onde as classes de permeabilidade se referem a:

- **Muitíssimo permeável** – permeabilidades superiores a 1 000 m/d;
- **Muito permeável** – permeabilidades entre 1 000 e 100 m/d;
- **Permeável** – permeabilidades entre 10 e 100 m/d;
- **Permeável a pouco permeável** – permeabilidades abaixo de 10 m/d.

Tomando em atenção o aspecto génese/litologia, podem definir-se os seguintes de tipos de aquíferos:

- **de turfeira** – na realidade não são verdadeiras unidades produtivas mas regiões onde o aparecimento de horizontes plácicos (impermeáveis) no solo leva à constituição de turfeiras (Menezes, 1993; Dias, 1996). São as turfeiras que cedem água às pequenas captações e não os terrenos onde estas se desenvolvem, pelo que não se podem designar concretamente como unidades aquíferas. As áreas de extensão e as produtividades são minúsculas.

- **piroclásticos** – unidades produtivas desenvolvidas em depósitos de natureza piroclástica (lapilli, pomes, lahares, etc.), como é o caso dos depósitos pomíticos da ilha Terceira (Menezes, 1993). O seu substrato (no caso de aquíferos suspensos) é geralmente um solo armazenado ou outro tipo de materiais impermeáveis. Neste grupo pode ainda individualizar-se as unidades produtivas em função da litologia em que se desenvolvem:

- *em escoadas de pomitos (submarinos ou sub-aéreos)*
- *em escoadas de ignimbritos (submarinos ou sub-aéreos)*
- *em escoadas de brechas (submarinos ou sub-aéreos)*
- *em escoadas de natureza basáltica (submarinos ou sub-aéreos)*
- *em escoadas de piroclastos sensus lato⁷⁵ (submarinos ou sub-aéreos)*

• **de escoada lávica** – unidades produtivas desenvolvidas em escoadas lávicas (a unidade saturada pode ser constituída por uma ou mais escoadas) que recobrem a camada "imperme". As escoadas podem ter diversas naturezas: basálticas, traquíticas, traquibasálticas, etc., pelo que as unidades produtivas podem ser individualizadas em função do tipo de escoada em que se desenvolvem:

- *em escoadas basálticas*
- *em escoadas traquíticas*
- *em escoadas intermédias*
- *em escoadas traquibasálticas*
- *em escoada peralcalinas*

• **de escoadas lávicas e piroclastos** – unidade produtiva desenvolvida num conjunto de depósitos piroclásticos e lavas que recobrem a camada "imperme". O tipo de unidade produtiva mais comum entre os aquíferos/níveis produtivos sub-superficiais. Neste grupo, talvez o mais variado, podem definir-se os seguintes tipos de unidades produtivas, desenvolvidas em:

- *em escoadas basálticas e pomitos*
- *em escoadas basálticas e ignimbritos*
- *em escoadas basálticas e piroclastos indiferenciados*
- *em escoadas traquíticas e pomitos*
- *em escoadas traquíticas e ignimbritos*
- *em escoadas traquíticas e piroclastos indiferenciados*
- *em escoadas intermédias e pomitos*
- *em escoadas intermédias e ignimbritos*
- *em escoadas traquibasálticas e pomitos*
- *em escoadas traquibasálticas e ignimbritos*
- *em escoadas traquibasálticas e pomitos*
- *em escoadas peralcalinas e pomitos*
- *em escoadas peralcalinas e ignimbritos*

• **de tubos de lava** – unidades produtivas desenvolvidas em escoadas, geralmente basálticas, que apresentam razoável abundância de cavidades e tubos de lava

⁷⁵ Com esta designação pretende-se designar todos os depósitos piroclásticos de natureza diversificada e que não se podem definir exclusivamente como pomitos ou ignimbritos.

por onde se dá a circulação preferencial das águas, sem excluir contudo a ocorrente em níveis escoriáceos porosos, fendas de retração por arrefecimento, ou eventuais fracturas secundárias. Tanto o regime de circulação como o tipo de vulnerabilidade à poluição são em tudo similares aos verificados para as unidades produtivas cársicas desenvolvidas em rochas carbonatadas. No caso de unidades aquíferas não superficiais a profundidade a que se encontram influencia o grau de compactação da escoada, provocando não raras vezes o colapso de vários tubos de lava e outras condutas, afectando a permeabilidade da formação (Rodrigues, 1993).

- **sedimentar** – unidades produtivas desenvolvidas em materiais sedimentares detríticos como depósitos de vertentes, aluviões, cascalheiras, grés ou outros. Contudo, dada a reduzida dimensão destes tipos de depósitos assim como as suas localizações desfavoráveis, nos Açores este tipo de unidades produtivas é virtualmente inexistente, com a eventual excepção da ilha de Santa Maria, mas aqui a maior parte dos diversos depósitos sedimentares (conglomerados, arenitos, argilas, calcários e calcarenitos, etc.) não tendem a funcionar como unidades produtivas, pelo menos com significado importante ao nível do abastecimento das populações, sendo mais comum que funcionem como zonas de baixa permeabilidade ou diminutas unidades produtivas (ex.: conglomerados do Pico Alto que na totalidade de várias manchas dispersas têm apenas 2 km² de área) (Menezes, 1993).

- **de caldeira** – embora não sejam unidades aquíferas desenvolvidas num tipo litológico específico e o critério da sua individualização seja mais geomorfológico, estas unidades – de alguma importância virtual em certas ilhas – desenvolvem-se nas escoadas que recobrem o interior das caldeiras vulcânicas, sendo delimitadas na sua base por aquitardos ou camadas impermeáveis que colmatam o fundo das caldeiras e cujas espessuras e naturezas podem ser diversas. No caso dos níveis mais superficiais são geralmente desenvolvidos em unidades basálticas muito recentes; os níveis mais profundos – desenvolvidas nas escoadas que cobrem o interior de caldeiras soterradas – são tipos raros de unidade produtiva (Menezes, 1993).

A sua distribuição nos Açores – assim como a sua relação com o escoamento superficial – foi definida de acordo com a informação das cartas geológicas, sendo apresentada a caracterização destes aquíferos para a ilha Terceira no Quadro XLI. Nos parágrafos seguintes dá-se uma descrição geral das propriedades dos sistemas aquíferos, baseada em Novo *et al.* (2001) e DROTRH e IA (2001). Procurou-se fazer uma quantificação do escoamento superficial para estes sistemas aquíferos mas os dados existentes eram insuficientes para determinar estes valores de escoamento, pelo que se optou por fazer uma avaliação exclusivamente qualitativa, baseada sobretudo em critérios litológicos, geomorfológicos e propriedades hidráulicas conhecidas das formações em análise. Refira-se que para várias destas unidades tais propriedades hidráulicas eram ainda mal conhecidas.

Quadro XLI – Tipos de Litologias das Unidades Produtivas por Regiões Hidrogeológicas da Ilha Terceira

Região da Ilha/Sistemas Aquíferos		Génese/Tipo Litológico	Escoamento Superficial
Novo <i>et al.</i> (2001)	DROTRH e IA (2001)		
Serra do Cume	Serra do Cume	Piroclástico ignimbrítico; Lávico + Piroclástico (traquitos + piroclastos indiferenciados)	Elevado
Serra da Ribeirinha	Ribeirinha	Lávico + Piroclástico (traquitos + piroclastos indiferenciados); Lávico traquítico	Baixo
Lajes	Graben	Piroclástico pomítico; Piroclástico ignimbrítico; Lávico traquítico	Qse. Inexistente
	Ignimbritos das Lajes	Piroclástico ignimbrítico	Qse. Inexistente
Serra de Santiago	Serra de Santiago	Escoadas lávicas	Qse. Inexistente
Guilherme Moniz - Pico Alto; Cinco Picos	Caldeira Guilherme Moniz-São Sebastião*	Tubos de lava; Lávico basáltico	Qse. Inexistente
	Caldeira Guilherme Moniz-São Sebastião	Lávico basáltico; Lávico traquítico; Piroclástico <i>sensus lato</i> ; Lávico + Piroclástico (traquito ou basalto + piroclastos indiferenciado)	Qse. Inexistente
	Central	Piroclástico Pomítico; Piroclástico ignimbrítico; Lávico + Piroclástico traquito ou basalto + piroclastos pomíticos ou ignimbríticos)	Médio
	Labaçal-Quatro Ribeiras	Tubos de lava; Lávico traquítico; Piroclástico indiferenciado; Lávico + Piroclástico (traquitos + piroclastos indiferenciados)	Baixo
Zona Transição	Biscoitos-Terra Chã	Tubos de lava; Lávico traquítico; Lávico basáltico	Qse. Inexistente
Santa Bárbara	Santa Bárbara Superior	Tubos de lava; Lávico traquítico; Piroclástico pomítico; Piroclástico de brecha	Qse. Inexistente
	Santa Bárbara Inferior	Turfeira; Piroclástico pomítico; Lávico traquítico; Lávico basáltico	Elevado

*Refere-se especificamente à caldeira do Cabrito.

No sistema de **Santa Bárbara**, onde se podem encontrar aquíferos de turfeira, de escoada lávica e de escoada lávica + piroclastos, embora os níveis aquíferos pareçam possuir uma permeabilidade significativa, a globalidade do maciço é dominada pelo escoamento superficial. No sub-sistema de **Santa Bárbara Superior** (considerado sistema por direito próprio segundo DROTRH e IA, 2001) os níveis aquíferos são de reduzida dimensão, estando associados a pequenas escoadas e depósitos pomíticos de aparelhos vulcânicos adventícios, com volumes de armazenamento de água reduzidos, devido às reduzidas dimensões e espessura das unidades litológicas; deste modo o seu esgotamento é normalmente rápido, dando origem a nascentes temporárias. O escoamento superficial sobre estas escoadas é em regra muito baixo, sendo alimentado pelas nascentes que drenam os aquíferos, as quais funcionam assim como áreas de descarga. Devido a este baixo escoamento superficial admite-se que a permeabilidade das unidades aquíferas seja elevada. As nascentes que drenam estas unidades têm uma grande variação dos seus caudais e um esgotamento no geral rápido. Assim, uma rápida

circulação e esgotamento dos níveis produtivos, associada à sua reduzida extensão e superficialidade, leva a que este sistema seja considerado como muito susceptível à estiagem. A zona de caldeira, que funciona essencialmente como área de recarga para as formações subjacentes, assinalada em DROTRH e IA (2001) como pertencente ao sistema *Santa Bárbara Inferior*, apresenta “aquíferos” de turfeira que são superficiais; estes funcionam como zonas de armazenamento de água, cedendo-a de modo constante e controlado às unidades produtivas subjacentes, dando origem a uma recarga diferida, que é originada não apenas na precipitação mas sobretudo nos nevoeiros (precipitação oculta). O sistema de Santa Bárbara Inferior regista um escoamento elevado, pelo que se admite que a recarga seja baixa e, apesar de potencialmente poder possuir aquíferos de extensão lateral significativa em profundidade, admite-se que seja um sistema susceptível a eventualmente pouco susceptível à estiagem, dependendo da dimensão dos níveis produtivos e sua capacidade de armazenamento.

O sistema de **Biscoitos-Terra Chã**, corresponde a uma região de infiltração muito elevada (quase não é registado escoamento superficial), com alguns níveis produtivos onde captam os furos da Terra Chã. São unidades predominantemente lávicas, onde a circulação se realiza ao longo dos planos de descontinuidade entre as escoadas e dos planos de fracturação, ou ao longo dos muitos vacúolos e tubos de lava de algumas das formações mais recentes. Admite-se que a maior parte da precipitação sobre esta região atinge o aquífero de base, pressupondo-se que a circulação até ao aquífero de base se realize de forma rápida. Admitindo-se uma recarga elevada, um possivelmente elevado coeficiente de armazenamento, e uma extensão significativa, aliado a uma possível profundidade significativa dos níveis produtivos, pressupõe-se que a sua susceptibilidade à estiagem seja baixa. Contudo, dado o pouco conhecimento efectivo sobre os volumes de água em circulação neste sector da ilha, e os seus percursos dominantes, considera-se que se deveriam desenvolver estudos posteriores, para determinar quantitativamente estes valores e os principais percursos de circulação subterrânea até ao aquífero basal.

O sistema **Serra de Santiago** é constituído essencialmente por aquíferos de escoadas lávicas, de espessuras moderadas a baixas, sendo a circulação controlada pela porosidade e pela fracturação dos materiais; admite-se que a fracturação possa ser o principal definidor dos percursos de circulação, dada a alteração e compactação de várias das escoadas deste sistema aquífero. Os níveis suspensos constituem as principais fontes de abastecimento, drenando para nascentes a cotas normalmente entre os 30 a 40 m de altitude, e têm no geral baixa produtividade, capacidade de armazenamento baixa, e portanto também deverão ser sensíveis aos efeitos de estiagens prolongadas. Regra geral a infiltração parece ser elevada (quase não há escoamento superficial) sugerindo uma recarga significativa dos aquíferos. O carácter temporário das raras linhas de água é um indicador do esgotamento dos níveis aquíferos suspensos que as alimentam. Dada a reduzida dimensão dos níveis produtivos, o seu rápido escoamento, e um coeficiente de armazenamento moderado a baixo leva a que este sistema tenha propensão para ser susceptível à estiagem.

O sistema da **Serra da Ribeirinha** é dominado por aquíferos de escoada lávica, de espessura mediana a baixa, suspeitando-se que as suas espessuras saturadas sejam no geral reduzidas. De permeabilidade moderada e circulação determinada pela fracturação

os níveis produtivos têm no geral uma fraca produtividade, encontrando-se as nascentes mais significativas sempre associadas a regiões de falha. Regra geral a infiltração é alta (escoamento superficial reduzido) e portanto a recarga dos aquíferos é significativa. No entanto a sua baixa capacidade de armazenamento e dimensão relativamente pequena dos níveis produtivos sugere que seja um sistema aquífero muito susceptível à estiagem.

O sistema aquífero da **Serra do Cume** é dominado por aquíferos pomíticos (o sistema Cume 1), embora ocorram também aquíferos lávicos (Cume 2) e níveis lávicos + piroclásticos (Menezes, 1993; Rodrigues, 2002 a). As espessuras dos níveis produtivos a que se associam nascentes são regra geral pequenas a moderadas, podendo nalguns casos ser bastante reduzidas. Possuem baixa espessura saturada, o que, aliado à baixa espessura total dos níveis produtivos aponta para baixa capacidade de armazenamento. Este baixo armazenamento, associado a uma permeabilidade moderada a baixa, reflectida por um escoamento superficial elevado e reduzida dimensão dos níveis aquíferos cria as condições para um esgotamento apreciável dos níveis produtivos. Estes níveis, no geral suspensos, têm circulação mista porosa-fracturada e dão origem a nascentes de pequeno caudal. As ribeiras são zonas de descarga dos aquíferos e o seu carácter temporário aponta para o esgotamento dos níveis aquíferos que as alimentam, indiciando a alta susceptibilidade destes à estiagem.

O sistema aquífero do **Labçal-Quatro Ribeiras** é constituído por aquíferos lávicos, piroclásticos e lávicos + piroclásticos. Os níveis produtivos têm espessura média, embora por vezes surjam de espessura reduzida. A circulação tende a ser mista porosa-fracturada nos níveis associados a piroclastos e predominantemente de fractura nas formações lávicas, muito em particular nas pertencentes às Formações Peralcalinas do Pico Alto e aos Basaltos Superiores. Tipicamente as nascentes ocorrem ao longo de fracturas, ou na intersecção da topografia com os níveis produtivos. As ribeiras são zonas de descarga dos aquíferos e o seu carácter temporário demonstra o regime não permanente das nascentes de leito de ribeira, indiciando o seu rápido esgotamento. Algumas das unidades produtivas – Agualva, Quatro Ribeiras, Santa Cruz-Tombo – têm coeficientes de armazenamento altos, o que contudo não ocorre com outras unidades e, em termos individuais, com diversos níveis produtivos individualizados. Regra geral a infiltração é elevada (o escoamento superficial é baixo), donde a recarga dos aquíferos é significativa. Deste modo, neste sistema aquífero existirão níveis e unidades produtivas pouco susceptíveis aos eventos de estiagem mas outras serão susceptíveis, dependendo tal das dimensões do aquífero, sua superficialidade, espessura da zona saturada e sua capacidade de armazenamento.

O sistema aquífero do **Ignimbrito das Lajes** é constituído essencialmente por aquíferos piroclásticos, com comportamento poroso a poroso-fracturado. Os níveis produtivos têm uma grande continuidade lateral e a permeabilidade é no geral elevada. Alguns níveis, no entanto, apresentam produtividades baixas (Rodrigues, 2002 a). Regra geral a infiltração é elevada (quase não há escoamento superficial) e portanto a recarga dos aquíferos é significativa. O conjunto dos níveis produtivos tende a apresentar uma capacidade de armazenamento moderada, o que, aliado à extensão dos níveis produtivos e elevada infiltração, fará com que este sistema seja no seu todo pouco afectado pela estiagem, embora o mesmo não se possa dizer de alguns dos seus níveis, em termos individuais, em particular os mais superficiais.

O sistema aquífero do **Graben** é constituído essencialmente por aquíferos piroclásticos + lávicos, tendo um comportamento predominantemente fracturado a poroso-fracturado, apresentando no seu todo uma permeabilidade elevada. Os níveis produtivos, livres a confinados, têm no geral uma continuidade lateral muito significativa, pelo que embora a sua capacidade de armazenamento possa ser moderada a baixa, o volume total de água armazenada (no conjunto dos vários níveis) é importante. A infiltração é elevada (quase não há escoamento superficial) e portanto a recarga dos aquíferos é significativa. Dada a grande extensão lateral dos níveis produtivos, e a recarga significativa dos mesmos, é de admitir que este sistema aquífero, no seu todo, seja pouco susceptível à estiagem. Deve contudo referir-se a grande variação da espessura da zona saturada de alguns aquíferos muito superficiais, o que é reflectido pela existência de zonas alagadas nas épocas de Inverno e que tendem a desaparecer no Estio.

O sistema aquífero **Central** é constituído por aquíferos predominantemente piroclásticos, com espessuras das unidades produtivas baixo a médio. A circulação é mista de poroso-fracturado, podendo ter por vezes alguma influência hidrotermal. A permeabilidade é moderada e no geral a infiltração é moderada (escoamento superficial médio, mas com sectores onde é quase inexistente), fornecendo uma recarga mediana aos aquíferos. Alguns destes aquíferos podem ainda ser alimentados por níveis do sistema Guilherme Moniz-S. Sebastião. A capacidade de armazenamento é moderada, o que, aliado a uma recarga moderada e extensão mediana dos níveis produtivos, torna este sistema aquífero algo susceptível à estiagem.

O sistema aquífero da **Caldeira de Guilherme Moniz-S. Sebastião** é constituído por aquíferos lávicos, lávicos + piroclásticos e, nas formações mais recentes, em aquíferos de “tubo de lava”⁷⁶. A circulação é essencialmente fracturada a porosa-fracturada e, no caso dos aquíferos de “tubo de lava” um funcionamento hidráulico similar ao dos aquíferos cársicos. São formações na sua larga maioria muitíssimo permeáveis e regra geral a infiltração é mui elevada (quase não há escoamento superficial), donde a recarga dos aquíferos é significativa. A capacidade de armazenamento é alta. As produtividades variam entre níveis pouco produtivos e níveis com produtividades significativas ou mesmo elevadas (ex.: Cabrito). A variação de espessura da zona saturada pode ser muito significativa nos níveis mais superficiais, sendo que nalguns casos, durante a época húmida, podem mesmo criar-se zonas alagadas à superfície. Alguns níveis aquíferos têm extensão significativa mas outros (ex.. Cabrito) têm uma extensão lateral reduzida, podendo, quando associada a altas permeabilidades, originar curtos tempos de residência e rápido esgotamento das nascentes associadas a estes níveis. Por exemplo, no aquífero do Cabrito, cuja permeabilidade é muito elevada, dado ser aquífero de “tubo de lava” com muitos tubos de lava e outros poros de grandes dimensões, o tempo de residência das águas está calculado entre 11 a 33 dias, e como a espessura saturada é bastante baixa, apesar da elevada recarga que pode alimentá-lo, o seu esgotamento é no geral rápido, verificando-se uma variação de até 2 ordens de grandeza entre os caudais de Inverno e de Verão das

⁷⁶ Aquíferos cuja estrutura interna é dominada pela ocorrência de significativa de tubos de lava e outras estruturas macroporosas; a sua condutividade e porosidade eficaz é muito elevada e em termos hidrodinâmicos tem um comportamento algo similar aos aquíferos cársicos.

nascentes que o drenam. Assim, e apesar do alto coeficiente de armazenamento, a sua reduzida dimensão lateral e em termos de espessura, aliada a uma rápida circulação, tornam este aquífero muito susceptível à estiagem. Por outro lado, os aquíferos desenvolvidos no sector de Cinco Picos-S. Sebastião, são aquíferos permeáveis, com uma capacidade de armazenamento moderada a alta e grande extensão lateral, vários deles confinados; isto, associado a uma região de infiltração total (de recarga muito intensa para os aquíferos superficiais), leva a que a susceptibilidade à estiagem seja reduzida.

Esta é uma análise que se considera a necessitar de estudos posteriores, especialmente estudos de campo e laboratoriais, para aferir da importância das permeabilidades e outras propriedades hidráulicas dos aquíferos (e até mesmo de outros factores que afectam o ciclo hidrológico) na resposta destes às alterações climáticas, assim como de um mais detalhado zonamento quanto valores de escoamento superficial por sistema aquífero, tipo de aquífero e grau de alteração. Outros estudos que se consideram de importância para a compreensão da possível susceptibilidade dos sistemas aquíferos à estiagem e outras consequências das alterações climáticas incluem a definição das velocidades e percursos de circulação através destes vários sistemas aquíferos, incluindo as quantidades de água que são transferidas para o meio marinho por via de nascentes submarinas.

6.4. Resposta dos Sistemas Hidrogeológicos, em Função das suas Propriedades Intrínsecas, às Alterações Climáticas

Embora as propriedades intrínsecas dos aquíferos não mudem com as alterações do clima, as respostas dos aquíferos em função dessas mesmas propriedades será distinta para condições climáticas distintas. Como se viu no Capítulo 5, uma subida dos valores da precipitação, e descontando o efeito da vegetação, gera um aumento do escoamento superficial que é tanto mais marcado quanto menos permeáveis forem os solos; para solos extremamente permeáveis, contudo, não se verifica acréscimos significativos do escoamento. Tal como o escoamento varia em função das alterações dos volumes de precipitação e evapotranspiração, o mesmo sucede com as recargas, sendo que no caso destas últimas, o volume que é retido no aquífero depende não apenas da alteração da evapotranspiração e precipitação mas também do volume de vazios dos aquíferos, ou mais exactamente da porosidade eficaz e coeficiente de armazenamento⁷⁷. Assim, para diferentes cenários de alteração climática é de prever que as respostas dos sistemas aquíferos sejam distintas; em especial quanto ao escoamento dado que este depende também da quantidade de água disponível que efectivamente o aquífero armazena. Esta quantidade armazenada depende, como vimos, do volume de vazios; o volume de vazios altera-se ao longo do tempo, com a alteração dos materiais que compõem os aquíferos. E, embora à escala humana estas modificações da porosidade não sejam no geral significativas dada a lentidão dos processos de alteração

⁷⁷ Se um aquífero não tiver capacidade para receber toda a água disponível para a recarga, esta terá de ser conduzida sobretudo para o escoamento, e um incremento nos volumes disponíveis para a recarga na prática não se reflectem nos volumes de reservas hídricas (passíveis de ser utilizadas para consumo).

das rochas, a velocidade de alteração das rochas também se altera com o clima. Em climas tropicais, por exemplo, a alteração é muito mais rápida do que em climas frios, e também muito mais profunda. Deste modo, para uma total compreensão dos impactos das alterações climáticas sobre o funcionamento dos aquíferos deveria também analisar-se as alterações que as modificações do clima poderão induzir em propriedades intrínsecas dos aquíferos, tais como as que acima se referiram.

Para um correcto estudo destas modificações seria necessário expor amostras não alteradas dos solos (isto é, que mantenham as mesmas condições físicas e estruturais dos solos *in situ*) dos sistemas aquíferos a diferentes condições de precipitação/embebimento. Estes estudos deveriam ser tanto laboratoriais como de campo, muito em especial de campo, dado os comportamentos das amostras laboratoriais serem por vezes algo distintos dos materiais *in situ*. Estes ensaios deveriam reproduzir as condições de temperatura e precipitação para diferentes cenários de alterações climáticas, e, muito em especial, as novas intensidades e frequências dos eventos de precipitação, dado que são sobretudo estes aspectos que condicionam a resposta dos aquíferos em termos de recarga/escoamento superficial. A temperatura é um factor também de importância dado que condicionará a velocidade de alteração dos materiais. No entanto os actuais cenários de alterações climáticas para a ilha Terceira não podem ainda fornecer detalhes ao nível das modificações nas frequências, intensidades e mesmo durações dos eventos de precipitação, pelo que não seria possível realizar ensaios minimamente realistas das respostas dos aquíferos às alterações climáticas que actualmente se consideram como mais prováveis.

Ao mesmo tempo a impossibilidade logística e monetária da recolha destas amostras ou da instalação de áreas experimentais no campo para a realização destes ensaios tornou impossível o estudo das respostas dos aquíferos de forma experimental e minimamente sólida. Assim apenas é possível estabelecer possíveis susceptibilidades dos aquíferos às alterações climáticas em termos qualitativos e baseado exclusivamente nas suas propriedades conhecidas.

Acrescendo a que em vastas áreas da ilha as próprias propriedades hidráulicas do meio aquífero são mal conhecidas (ex.: sistemas de Santa Bárbara, cf. DROTRH e IA, 2001) estas susceptibilidades agora definidas são meramente teóricas e passíveis de eivar de sérios erros. Considera-se que, no futuro, será fundamental fazer estudos de campo e laboratório para avaliar das respostas dos meios aquíferos a diferentes intensidades, durações e frequências de eventos de precipitação, se se pretende definir com clareza a susceptibilidade dos aquíferos às alterações climáticas.

6.4.1. RESPOSTA DOS SISTEMAS HIDROGEOLÓGICOS AOS CENÁRIOS DE ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS: CLASSIFICAÇÃO DAS SUSCEPTIBILIDADES ÀS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS DOS SISTEMAS AQUÍFEROS EM FUNÇÃO DAS SUAS PROPRIEDADES INTRÍNSECAS

Do exposto neste e nos capítulos anteriores resulta que as propriedades intrínsecas dos aquíferos que foram consideradas como mais importantes em termos de vulnerabilidade às alterações climáticas, são:

- **Permeabilidade** – controla a velocidade de cedência de água, a infiltração, e em consequência o escoamento superficial, logo também a recarga; condicionada pelo estado de alteração e tipo de formações (se lávicas se piroclásticas, dado as mudanças na permeabilidade com o aumento da alteração sofrerem uma evolução distinta no caso de materiais piroclásticos ou ignimbríticos e no caso de lavas); também a idade das formações está directamente correlacionada com o estado de alteração, não sendo ainda de excluir os efeitos da circulação de fluidos hidrotermais sobre a permeabilidade dos materiais.
- **Área/Dimensões** – é um dos determinantes do volume passível de ser ocupado pela recarga, ou seja, do volume de armazenamento do aquífero; aquíferos de dimensões reduzidas possuem um baixo volume de armazenamento e portanto não poderão beneficiar de eventos de recarga elevada, conduzindo os excedentes para o escoamento superficial. Como os volumes de água armazenada são reduzidos, o esgotamento pode ser rápido e esta tendência acentuar-se-á se os períodos de estiagem se tornarem mais prolongados.
- **Capacidade de Armazenamento** – é outro dos determinantes do volume passível de ser ocupado pela recarga, ou seja, do volume de armazenamento do aquífero; depende, por unidade volúmica de aquífero, do volume de vazios, isto é, da porosidade e em especial da porosidade eficaz. À partida os aquíferos com baixa capacidade de armazenamento não poderão beneficiar do incremento de precipitação e do maior volume de água disponível para a recarga, podendo ficar mais susceptíveis a eventos de seca.
- **Superficialidade do Aquífero** – determina a importância das perdas de água por evaporação assim como a importância dos fenómenos de capilaridade e é um dos factores importantes para a susceptibilidade de um aquífero à estiagem⁷⁸; os aquíferos muito superficiais, embora mais facilmente abastecidos pela infiltração, podem sofrer perdas significativas, por evapotranspiração, da sua água armazenada, tornando-se susceptíveis a períodos prolongados de seca, em particular se em condições de temperaturas mais elevadas; esta susceptibilidade é tanto maior quanto menor for a dimensão do aquífero. Os efeitos de perda de água para a superfície podem também ter um reflexo na qualidade desta, promovendo a salinização da zona vadosa, levando a um aumento dos sais nas posteriores águas de recarga e, em casos extremos, até a alterar a permeabilidade da zona vadosa, por alteração da estrutura dos solos devido às concentrações de sais.

Admite-se ainda que outras propriedades intrínsecas dos aquíferos possam desempenhar um papel importante na sua vulnerabilidade às alterações climáticas, mas

⁷⁸ Períodos prolongados de ausência de chuva.

Análise das Características Intínsecas dos Vários Sistemas Hidrogeológicos Insulares e sua Resposta à Alterações Climáticas

para a identificação destas propriedades e sua importância nesta vulnerabilidade será necessário um conjunto de estudos posteriores, com forte componente experimental.

No quadro seguinte são apresentados os aspectos de susceptibilidade dos aquíferos às alterações climáticas relacionados com a permeabilidade e área dos aquíferos (Quadro XLII). Neste Quadro é referenciado o tipo litológico pois as litologias têm, em conjunto com o estado de alteração, relação com as permeabilidades dos aquíferos. A idade está por sua vez directamente relacionada com o estado de alteração dos materiais dos aquíferos e este estado de alteração está relacionado quer com a porosidade eficaz (e volumes de armazenamento), quer com a permeabilidade. Em vez da dimensão do aquífero foi usada a área pois não existem conhecimentos suficientemente detalhados da maioria dos aquíferos para concretamente definir as suas dimensões. A permeabilidade e a dimensão dos aquíferos são factores relacionados com o controlo da recarga dos aquíferos.

Quadro XLII – Relação entre os Aspectos que Afectam a Susceptibilidade dos Aquíferos às Alterações Climáticas e seus Factores Condicionantes

Região da Ilha/Sistemas Aquíferos		Tipo Litológico	Permeabilidade		Idade (10 ³ anos)	Estado de Alteração	Área (km ²)
			Classe	m/d			
Serra do Cume	Serra do Cume	Ignimbritos; Lávico + Piroclástico	Permeável a pouco permeável	--	≈ 23 a 19	Mediana. a Pouco Alterado	23,39
Serra da Ribeirinha	Ribeirinha	Lávico + Piroclástico	Permeável a muito permeável	--	≈ 23	Mediana. a Pouco Alterado	9,45
Lajes	Graben	Pomes; Ignimbritos; Lávico traquítico	Muito Permeável	731-732	≈ 23 a 19	Mediana. a Pouco Alterado	17,57
	Ignimbritos das Lajes	Ignimbritos;	Muito Permeável	124	18	Pouco Alterado	33,46
Serra de Santiago	Serra de Santiago	Lávico traquítico	Permeável a muito permeável	--	19	Pouco Alterado	4,91
Guilherme Moniz-Pico Alto; Cinco Picos	Caldeira Guilherme Moniz-São Sebastião	Tubos de lava; Lávico basáltico	Muitíssimo permeável	5 713	20 a 2	Muito Pouco a Pouco Alterado	78,13 (1)
	Central	Ignimbritos; Pomitos; Lávico + Piroclástico	Permeável	19-33	> 23 a 18,6	Mediana. a Pouco Alterado	24,28
	Labaçal-Quatro Ribeiras	Tubos de lava; Lávico traquítico; Piroclástico s.l.; Lávico + Piroclástico	Permeável a muito permeável	--	23 a 18	Pouco Alterado	52,67
Zona de Transição	Biscoitos-Terra Chã	Tubos de lava; Lávico traquítico e basáltico	Muito permeável	121	≈ 25 a 0	Muito Pouco a Pouco Alterado	57,99
Santa Bárbara	Santa Bárbara Superior	Tubos de lava; Lávico traquítico; Piroclástico; Pomes	Muito permeável	--	≈ 18,6	Mediana a Pouco Alterado	16,85
	Santa Bárbara Inferior	Turfeira; Pomes; Lávico traquítico, basáltico	Permeável	--	≈ 25	Pouco Alterado	84,75

(1) para o total de afloramento de Cinco Picos + Guilherme Moniz

Daqui se verifica que como as formações são bastante recentes e se encontram em regra pouco alteradas, as suas permeabilidades tendem a ser intermédias a altas, sendo que a capacidade de infiltração (e por relação inversa a densidade de drenagem) está em larga medida condicionada não apenas pelas diferenças na permeabilidade, mas

Análise das Características Intínsecas dos Vários Sistemas Hidrogeológicos Insulares e sua Resposta à Alterações Climáticas

também pelas condicionantes topográficas. No geral um escoamento mais elevado ocorre em zonas de declives acentuados, com cobertura piroclástica medianamente a pouco alterada.

Com base nas simulações já efectuadas (cf. Capítulo 5) verifica-se que os terrenos que de tenderão a receber menor quantidade de recarga nos cenários de alteração dos regimes de precipitação são os menos permeáveis (com maiores valores de NC), e que a permeabilidade dos solos está ligada ao grau de alteração das litologias de que derivam, sendo que a permeabilidade abaixo do solo depende do grau de alteração e fracturação das litologias aí existentes⁷⁹. Como a susceptibilidade às alterações climáticas depende não apenas da permeabilidade mas também da área/dimensão do aquífero e capacidade de armazenamento, no que toca à questão das recargas, o Quadro XLIII apresenta a classificação, para os vários sistemas aquíferos da ilha Terceira, dos diversos factores que influenciam nesta susceptibilidade.

Quadro XLIII – Factores de Susceptibilidade dos Aquíferos às Alterações Climáticas, Analisando Permeabilidades e Armazenamentos

Região da Ilha/Sistemas Aquíferos		Permeabilidade		Área (km ²)	Capacidade de Armazenamento
		Class. Qualitativa	K (m/d)		
Serra do Cume	Serra do Cume	Permeável a pouco permeável	--	23,39	Moderado a baixo
Serra da Ribeirinha	Ribeirinha	Permeável a muito permeável	--	9,45	Baixo
Lajes	Graben	Muito Permeável	731-732	17,57	Moderado a baixo
	Ignimbritos das Lajes	Muito Permeável	124	33,46	Moderado
Serra de Santiago	Serra de Santiago	Permeável a muito permeável	--	4,91	Baixo
Guilherme Moniz-Pico Alto; Cinco Picos	Caldeira Guilherme Moniz-S. Sebastião (1)	Muitíssimo permeável	5 713	78,13	Alto
	Central	Permeável	19-33	24,28	Moderado
	Labaçal-Quatro Ribeiras	Permeável a muito permeável	--	52,67	Moderado
Zona de Transição	Biscoitos-Terra Chã	Muito permeável	121	57,99	Alto
Santa Bárbara	Santa Bárbara Superior	Muito permeável	--	16,85	--
	Santa Bárbara Inferior	Permeável	--	84,75	--

(1) Considera conjuntamente toda a região de Guilherme-Moniz/Cinco Picos e caldeira do Cabrito

Este quadro foi obtido analisando qualitativamente os aspectos área dos aquíferos, permeabilidade/escoamento superficial, capacidade de armazenamento, atribuindo para a conjugação destes factores diferentes graus de susceptibilidade. Dado que não foi possível realizar ensaios de campo, não se pôde quantificar que factores mais afectam esta susceptibilidade nem a quantificação da sua importância no total da resposta dos aquíferos às alterações climáticas, foi atribuído a cada factor um peso mais ou menos equivalente. No armazenamento foram consideradas as seguintes classes:

Análise das Características Intínsecas dos Vários Sistemas Hidrogeológicos Insulares e sua Resposta à Alterações Climáticas

- ◆ **Alto** – área > 55 km²; porosidade mínima na ordem entre 3 a 6%, podendo a máxima chegar aos 35%;
- ◆ **Moderado** – área entre 30 a 55 km²; porosidade mínima de 3 a 11%;
- ◆ **Moderado a baixo** – área entre 10 a 30 km²; porosidade mínima de 3%;
- ◆ **Baixo** – área < 10 km²; porosidade mínima de 3%; para áreas inferiores a 5 km² as porosidades mínimas podem ser superiores a 11%;
- ◆ **Indefinido** – não são conhecidas porosidades ou coeficientes de armazenamento de nenhuma das formações do sistema aquífero.

Para a definição destas classes foi cruzada a informação conhecida sobre as áreas dos aquíferos e as porosidades eficazes das formações que os constituem e das quais há dados conhecidos, fazendo-se a partir destes uma avaliação qualitativa da provável capacidade de armazenamento para cada sistema aquífero. O raciocínio base seguido foi o de que um sistema aquífero com uma grande extensão e porosidade média de valores intermédios terá um maior volume disponível para o armazenamento do que um sistema aquífero de reduzidas dimensões, mesmo que a sua porosidade média seja muito elevada. Para as dimensões da ilha consideraram-se como sistemas aquíferos de grande extensão os que tivessem área > 55 km²; aquíferos de dimensão média os compreendidos entre 10 e 55 km²; os pequenos aquíferos terão dimensões < 10 km². O armazenamento alto será definido por sistemas aquíferos de grande extensão e com porosidades eficazes medianas a elevadas; o armazenamento baixo será aplicado aos sistemas aquíferos de área reduzida e as restantes classes reflectem as situações intermédias.

Para a permeabilidade as classes foram definidas com base nos dados conhecidos de condutividade hidráulica ou, na ausência destes, nas indicações indirectas que se poderiam inferir a partir das litologias de cada sistema aquífero. Dado que a quantidade de valores conhecidos deste parâmetro hidráulico é reduzida, o que diminui bastante a sua representatividade, em particular quando se trata de terrenos de tanta variabilidade vertical e horizontal como os que se encontram nas ilhas vulcânicas, a inferência (qualitativa) do comportamento hidráulico das formações aquíferas a partir da litologia e outras características geológicas quando conhecidas (ex.: fracturação) foi sempre usada. As classes consideradas foram as seguintes:

- ◆ **Permeável a pouco permeável** – permeabilidades abaixo de 10 m/d; litologias dominadas por formações muito argilificadas, escoadas compactas com reduzida fracturação e reduzidos níveis de escórias.
- ◆ **Permeável** – permeabilidades entre 10 e 100 m/d; formações com porosidade intergranular mediana, densidade de fracturação mediana, com argilificação mediana a baixa.
- ◆ **Muito permeável** – permeabilidades entre 1 000 e 100 m/d; formações com grande porosidade intergranular (ex.: piroclastos grosseiros recentes),

⁷⁹ Constituintes dos aquíferos e da zona não saturada, caso esta exista abaixo da camada de solo.

Análise das Características Intínsecas dos Vários Sistemas Hidrogeológicos Insulares e sua Resposta à Alterações Climáticas

densidade de fracturação importante, pouco colmatada, e/ou importantes níveis de escórias pouco alteradas, com reduzida argilificação.

- ◆ **Muitíssimo permeável** – permeabilidades superiores a 1 000 m/d; escoadas basálticas recentes, muito fracturadas, com grandes espessuras de escórias e/ou tubos de lava em abundância.

Analisando os factores determinantes para a susceptibilidade às alterações climáticas, na componente associada à recarga por intermédio das propriedades dos aquíferos, verifica-se que são sobretudo os aquíferos de menores dimensões os mais susceptíveis, mesmo que a sua recarga seja alta em termos absolutos (por unidade de área de aquífero), dado que a sua capacidade de armazenamento, por mor da respectiva dimensão, se torna reduzida. Os aquíferos pouco permeáveis, em especial se os níveis aquíferos individualizados são de pequenas dimensões, tornam-se muito susceptíveis. Aquíferos muito permeáveis, de grandes dimensões, grande capacidade de infiltração e de armazenamento são no geral aquíferos pouco susceptíveis, pelo menos a curto prazo, às variações de recarga induzidas pelas alterações climáticas. No Quadro XLIV é apresentada a situação para a ilha Terceira:

Quadro XLIV – Susceptibilidade dos Aquíferos às Alterações Climáticas: Componente Recarga

Região da Ilha/Sistemas Aquíferos		Permeabilidade	Capacidade de Armazenamento	Área (km ²)	Recarga	Susceptibilidade às Alterações Climáticas
Serra do Cume	Serra do Cume	Permeável a pouco permeável	Moderado a baixo	23,39	Baixa	Muito Alta
Serra da Ribeirinha	Ribeirinha	Permeável a muito permeável	Baixo	9,45	Média	Alta a Muito Alta
Lajes	Graben	Muito Permeável	Moderado a baixo	17,57	Alta	Média
	Ignimbritos das Lajes	Muito Permeável	Moderado	33,46	Alta	Baixa
Serra de Santiago	Serra de Santiago	Permeável a muito permeável	Baixo	4,91	Alta	Alta
Guilherme Moniz-Pi-co Alto; Cinco Picos	Guilherme Moniz -São Sebastião*	Muitíssimo permeável	Baixo	6 (2)	Alta	Alta
	Guilherme Moniz -São Sebastião	Muitíssimo permeável	Alto	78,13 (1)	Alta a Muito Alta	Muito Baixa
	Central	Permeável	Moderado	24,28	Média	Média
	Labaçal-Quatro Ribeiras	Permeável a muito permeável	Moderado	52,67	Média	Média
Zona de Transição	Biscoitos-Terra Chã	Muito permeável	Alto	57,99	Alta a Muito Alta	Muito Baixa
Santa Bárbara	Santa Bárbara Superior	Muito permeável	--	16,85	Média a Alta	Alta
	Santa Bárbara Inferior	Permeável	--	84,75	Média a Baixa	Média a Alta

(1) toda a área aflorante do sistema aquífero Guilherme Moniz-S. Sebastião; (2) corresponde apenas à área aproximada do aquífero do Cabrito; *sector do Cabrito.

As classes de susceptibilidade são definidas do cruzamento dos factores permeabilidade das formações aquíferas, capacidade de armazenamento, área e recarga. É uma classificação baseada essencialmente numa avaliação qualitativa, por existirem poucos dados conhecidos para a permeabilidade e para a capacidade de armazenamento,

e haver algumas pequenas discordâncias entre autores nos valores das recargas (cf. Novo et al., 2001 e DROTRH e IA, 2001), basicamente devido à utilização de metodologias diferentes de avaliação deste parâmetro. As classes de susceptibilidade às alterações climáticas/componente recarga consideradas foram:

- ◆ **Muito Alta** – as regiões de permeabilidade no geral baixa, um escoamento elevado, logo uma recarga baixa (em Novo *et al.*, 2001 corresponde a valores entre os 400-500 mm ano, o intervalo de valores mais baixo para a Terceira), baixa capacidade de armazenamento e áreas que sugerem uma pequena extensão do aquífero.
- ◆ **Alta** – regiões de permeabilidade alta a muitíssimo alta, marcadas por uma ausência quase total de escoamento superficial, indiciando recargas elevadas; como têm contudo áreas muito pequenas, ou níveis aquíferos isolados individuais de muito reduzidas dimensões (inferiores a 20 km² e no geral abaixo de 10 km²), a sua capacidade de armazenamento será diminuta e portanto a sua susceptibilidade foi considerada alta.
- ◆ **Média** – zonas permeáveis a muito permeáveis, com recarga média (cf. Novo et al., 2001) para os intervalos de valores de recarga da ilha, áreas medianas e que podem incluir algum volume em profundidade, o que lhes dá uma capacidade de armazenamento moderado, podendo nalguns casos aproximar-se da classe elevado; as recargas são medianas a altas. É incluído nesta classe um aquífero de área abaixo dos 20 km² porque a sua recarga, assim como permeabilidade, são elevadas.
- ◆ **Baixa** – são regiões muito permeáveis, com uma recarga elevada, uma capacidade de armazenamento moderada e uma extensão significativa.
- ◆ **Muito Baixa** – regiões de permeabilidades elevadas a muito elevadas, uma recarga elevada, de grande extensão e uma capacidade de armazenamento igualmente alta.

A avaliação dos factores determinantes para a susceptibilidade às alterações climáticas na componente associada à estiagem, relativos às propriedades dos aquíferos, é realizada no Quadro XLV. A susceptibilidade à estiagem está dependente da área do aquífero, da sua capacidade de armazenamento, permeabilidade e superficialidade. Aquíferos muito pouco permeáveis e/ou de área reduzida, logo com pressuposta baixa capacidade de armazenamento e reduzida capacidade de recarga, consideraram-se como muito susceptíveis; os aquíferos de menores dimensões e em particular se muito superficiais (como os associados a escoadas de centros vulcânicos adventícios) são os mais susceptíveis aos efeitos de estiagem. Aquíferos muito permeáveis mas de área reduzida, logo com tempos de residência curto (Ex.: Cabrito) são também considerados muito susceptíveis. Aquíferos de grande extensão lateral e permeabilidade elevada, a que se associa moderada a grande capacidade de armazenamento consideram-se no geral pouco susceptíveis, embora níveis mais superficiais e de menores dimensões possam apresentar uma maior susceptibilidade. Aquíferos de extensão mediana e capacidade de armazenamento moderada a alta consideram-se de susceptibilidade média, ou seja, susceptíveis.

Análise das Características Intínsecas dos Vários Sistemas Hidrogeológicos Insulares e sua Resposta à Alterações Climáticas

Refira-se que, pelas mesmas razões acima referidas para a susceptibilidade à componente recarga, esta avaliação, e o conseqüente estabelecimento de classes, é de ordem apenas qualitativa uma vez que existem poucos dados quantitativos, e os que existem são insuficientemente representativos dado o seu número e o tipo de formações aquíferas em causa (ex.: o n.º de valores de permeabilidade), para os parâmetros conducentes à susceptibilidade à estiagem.

**Quadro XLV – Susceptibilidade dos Aquíferos às Alterações Climáticas:
Componente Estiagem**

Região da Ilha/Sistemas Aquíferos		Permeabilidade	Capacidade de Armazenamento	Área (km ²)	Superficialidade das Unidades Produtivas	Susceptibilidade às Alterações Climáticas
Serra do Cume	Serra do Cume	Permeável a pouco permeável	Moderado a baixo	23,39	Muito superficial	Muito susceptível
Serra da Ribeirinha	Ribeirinha	Permeável a muito permeável	Baixo	9,45	Muito superficial	Muito susceptível
Lajes	Graben	Muito Permeável	Moderado a baixo	17,57	Medianamente Profundo	Muito susceptível
	Ignimbritos das Lajes	Muito Permeável	Moderado	33,46	Medianamente Profundo	Susceptível (3)
Serra de Santiago	Serra de Santiago	Permeável a muito permeável	Baixo	4,91	Superficial	Muito susceptível
Guilherme Moniz-Pico Alto; Cinco Picos	Guilherme Moniz-São Sebastião*	Muitíssimo permeável	Baixo	6 (2)	Muito superficial	Muito susceptível
	Guilherme Moniz-São Sebastião	Muitíssimo permeável	Alto	78,13 (1)	Superficial a Muito Superficial	Pouco susceptível
	Central	Permeável	Moderado	24,28	Superficial	Susceptível (3)
	Labçal-Quatro Ribeiras	Permeável a muito permeável	Moderado	52,67	Medianamente Profundo	Pouco susceptível (3)
Zona de Transição	Biscoitos-Terra Chã	Muito permeável	Alto	57,99	Profundo	Pouco susceptível
Santa Bárbara	Santa Bárbara Superior	Muito permeável	--	16,85	Muito superficial	Muito susceptível
	Santa Bárbara Inferior	Permeável	--	84,75	Profundo	Pouco susceptível (3)

(1) toda a área aflorante do sistema aquífero Guilherme Moniz-S. Sebastião; (2) corresponde apenas à área aproximada do aquífero do Cabrito; (3) localmente, alguns níveis produtivos muito superficiais podem ser bastante susceptíveis; *sector do Cabrito.

As classes de superficialidade, foram definidas a partir da informação da profundidade dos níveis aquíferos existente em Menezes (1993; citada em Novo *et al.*, 2001). Como se trata de sistemas aquíferos, com diversos níveis aquíferos, situados a diferentes profundidades e não raro com ligações entre si, por vezes difíceis de definir mesmo nos estudos mais específicos (Rodrigues, 2002), considerou-se como valor de superficialidade a profundidade média conhecida do nível aquífero mais superficial. Naturalmente, dada a complexidade dos sistemas aquíferos, com diversos níveis produtivos associados a pequenas escoadas adventícias (ex.: maciço de Santa Bárbara) ou com variações topográficas abruptas, podem ocorrer zonas muito superficiais num sistema aquífero cuja profundidade média do nível produtivo dominante seja bastante mais profunda. As classes de superficialidade que se consideraram foram:

- ◆ **Muito superficial** – profundidade < 10 m, e no geral inferior a 5 m;
- ◆ **Superficial** – profundidade entre 10 m e 30 m;
- ◆ **Medianamente Profundo** – profundidade entre 30 m e 50 m;
- ◆ **Profundo** – profundidade > 50 m.

Do cruzamento, qualitativo, de todos estes factores definiram-se as seguintes classes de susceptibilidade à estiagem:

- ◆ **Muito susceptível** – pequena área⁸⁰ (< 24 km²); armazenamento moderado a baixo, podendo ser alto em aquíferos de área muito reduzida (< 7 km²); pouco a muito permeável; em termos de superficialidade os aquíferos são muito superficiais, podendo ser medianamente superficiais se a capacidade de armazenamento for baixa e a área inferior a 20 km².
- ◆ **Susceptível** – área média (de 24 km² a 50 km²); armazenamento moderado; permeável a muito permeável; em termos de superficialidade os aquíferos são superficiais (se a permeabilidade não for muito elevada) a medianamente profundos.
- ◆ **Pouco susceptível** – grande área (> 50 km²); armazenamento moderado a alto. A superficialidade dos aquíferos é no geral “Profundo” podendo ser “Superficial a Muito superficial” se a capacidade de armazenamento for elevada e a área também elevada.

6.4.2. CARACTERIZAÇÃO DAS REGIÕES DE RECARGA E ESCOAMENTO SUPERFICIAL PREFERENCIAIS PARA OS VÁRIOS CENÁRIOS DE ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS

Como se referiu anteriormente, para uma correcta análise deste aspecto seria necessário realizar um conjunto de experiências de campo e laboratoriais, para diferentes cenários de precipitação e evapotranspiração, as quais não foi possível de realizar. Assim, a breve análise que aqui se apresenta baseia-se apenas nas simulações de cálculo de recarga e escoamento superficial apresentadas no Capítulo 5 para diferentes cenários de precipitação e evapotranspiração. De acordo com os resultados de recarga para estes cenários, tem-se que:

- ◆ **Cenários de Descida da Precipitação** – além da áreas com escoamento superficial quase nulo a nulo, as áreas que parecem apresentar um melhor potencial de recarga (as que sofrem menos perdas comparativamente à descida na precipitação) são as áreas de escoamento intermédio a baixo (ex.: NC = 38) e cobertura de gramíneas (Quadro XII); áreas com estas características são representadas por sectores significativos dos sistemas aquíferos Central, Ribeirinha, Serra de Santiago. Como representantes das zonas de infiltração total tem-se por exemplo os sectores dos Cinco Picos, Graben ou a área do Cabrito. Estas últimas zonas embora se mantenham como zonas preferenciais de recarga, poderão assinalar perdas significativas

⁸⁰ Relativamente à área total da ilha.

do volume de recarga face aos valores actuais; comportamento semelhante será de prever para as áreas de Biscoitos-Terra Chã que apresentem cobertura vegetal similar à do Cabrito. Assim, além das actuais zonas de recarga, é de admitir que zonas de escoamento moderado a fraco e coberto vegetal herbáceo se tornem também zonas de recarga significativa.

- ◆ **Cenários de Subida da Precipitação** – as áreas de escoamento intermédio a baixo (ex.: NC = 38) e cobertura de gramíneas são as que, depois das zonas de escoamento superficial nulo, registam os maiores acréscimos de recarga (Quadro XIV). Estas áreas estão especialmente representadas nos sistemas aquíferos Central, Ribeirinha, Serra de Santiago.
- ◆ **Cenários de Subida da Evapotranspiração** – as menores perdas ocorrem para as áreas de escoamento intermédio a baixo (ex.: NC = 38) e cobertura de gramíneas (Quadro XX), sendo o seu comportamento seguido de perto pelas zonas de não escoamento superficial e cobertura arbustiva/arbórea (AGUT = 105); para idêntica cobertura arbustiva/arbórea, verifica-se que o decréscimo na recarga é maior para as zonas menos permeáveis. De referir que as zonas de elevado escoamento superficial e zona radicular muito reduzida mostram uma redução de recarga semelhante às da zona arbustiva/arbórea. As maiores perdas de recarga registam-se para um coberto arbóreo em zonas de solos impermeáveis. Assim, depois das áreas de escoamento nulo, as zonas mais favoráveis à recarga têm cobertura de gramíneas e escoamento moderado a baixo (ex.: sistemas aquíferos Central, Ribeirinha, Serra de Santiago nas áreas dominadas por cobertura de gramíneas).
- ◆ **Cenários de Descida da Evapotranspiração** – as áreas que sofrem maior subida da recarga são as zonas de escoamento superficial elevado e cobertura arbórea (Quadro XXII). As zonas de escoamento superficial elevado e coberto vegetal de reduzida espessura radicular sofrem subidas moderadas. Por seu lado as zonas com menores aumentos de recarga são as zonas de escoamento superficial moderado e cobertura herbácea, seguidas das zonas de não escoamento. Assim, e para esta situação, as zonas com maiores subidas de recarga tenderão a ser no sistema aquífero de Serra do Cume onde haja cobertura arbórea e nas zonas do sistema aquífero de Santa Bárbara Inferior onde ocorra cobertura arbustiva/arbórea.
- ◆ **Cenário de Subida da Precipitação e Evapotranspiração** – as maiores subidas da recarga registam-se as áreas de escoamento superficial nulo e de seguida para as de escoamento superficial intermédio a baixo (ex.: NC = 38) e cobertura de gramíneas (Quadro XXIV). Estas regiões estão especialmente representadas nos sistemas aquíferos de Cinco Picos (incluindo Cabrito), Graben, Biscoitos-Terra Chã (para não escoamento) e (para escoamento moderado) aos sectores Central, Ribeirinha, Serra de Santiago.

De acordo com os resultados do escoamento superficial, tem-se que:

- ◆ **Cenários de Descida da Precipitação** – as zonas sem escoamento continuam a ter idêntico comportamento; as zona que sofrem menor decréscimo do escoamento superficial são as escoamento intermédio a alto (NC = 56 a 61) para uma cobertura arbustiva a arbórea (Quadro XVI); dentro destas regiões que se tornam assim mais favoráveis ao escoamento superficial, além das

zonas de escoamento superficial elevado podem incluir-se certas áreas de Lapaçal-Quatro Ribeiras e Santa Bárbara Inferior.

- ◆ **Cenários de Subida da Precipitação** – a maior subida no escoamento superficial verifica-se (Quadro XVIII) nas regiões de coberto herbáceo e escoamento moderado (NC = 38); o facto de também serem zonas onde se verifica significativo acréscimo da recarga pode indicar que sejam áreas de grandes excedentes de água, em relação a outros sectores com vegetação mais arbustiva/arbórea. Entre estas regiões incluem-se os sectores Central, Ribeirinha, Serra de Santiago.
- ◆ **Cenário de Subida da Precipitação e Evapotranspiração** – a maior subida do escoamento superficial verifica-se para os sectores de escoamento intermédio a alto (NC = 56 a 61) e cobertura vegetal arbustiva/arbórea (Quadro XXVI). Tal pode ser encontrado em sectores de Lapaçal-Quatro Ribeiras e Santa Bárbara Inferior.

Vê-se deste modo que o comportamento da recarga, e do escoamento superficial, é determinado não apenas pelas tendências de alteração das precipitações, temperaturas ou do coberto vegetal mas também por características intrínsecas do próprio sistema aquífero como seja o NC (relacionado com a capacidade de infiltração e permeabilidade dos terrenos), o qual se torna assim um parâmetro importante para a definição da vulnerabilidade dos sistemas aquíferos às alterações climáticas.

6.5. Caracterização Climática dos Sistemas Hidrogeológicos Insulares: Cenário Actual e Cenários Futuros

Segundo Novo *et al.* (2001), no cenário climático actual para os Açores, o zonamento da precipitação média versus tipos de unidades produtivas é o que se apresenta no Quadro XLVI.

Com base no adiante exposto quanto à variação das recargas em função da variação das precipitações, assim como da informação actualmente conhecida sobre a permeabilidade dos terrenos e a localização dos sistemas hidrogeológicos dos Açores (DROTRH e IA, 2001), pode definir-se para a ilha Terceira um conjunto de susceptibilidades indicadas no Quadro XLVII.

Esta é uma classificação qualitativa, eivada das limitações das classificações deste tipo, mas para chegar a uma classificação quantitativa seria necessário realizar um conjunto de ensaios de campo e laboratório que, pelas razões anteriormente enunciadas, não se conseguiram efectuar; seria também necessário um conhecimento mais profundo de propriedades como permeabilidades e coeficientes de armazenamento, que em muitas áreas da ilha são ainda mal conhecidos. Esta dificuldade em obter dados quantitativos esteve também na base da ausência de delimitação efectiva das áreas mais afectadas pelo aumento do escoamento superficial e da intrusão salina, e quantificação dos seus impactos sobre os recursos hídricos.

Quadro XLVI – Zonamento Aquíferos versus Microclima Local (Precipitação Média)

Precipitação Média (mm/ano)	Tipo de Unidade Produtiva	Regiões da Ilha
> 2 000 – Clima Muito Chuvoso	Turfeiras	Santa Bárbara
	Lavas + Depósitos Piroclásticos	Vertente Guilherme Moniz-Pico Alto; Cinco Picos; Serra do Cume
	Caldeira	Caldeira de Guilherme Moniz
	Aquífero de Base	Zona de Transição nas zonas de altitude
1 000 a 2 000 – Clima Chuvoso	Depósitos Piroclásticos	Encostas W e N de Santa Bárbara; Serreta; Raminho; Altares
	Lavas + Depósitos Piroclásticos	Litoral do Maciço de Guilherme Moniz-Pico Alto
	Aquífero de Base	Região baixa da Zona de Transição
< 1 000 – Clima Moderadamente Chuvoso	Depósitos Piroclásticos	Encosta a N de Angra do Heroísmo (unidade produtiva S. Rafael)
	Lavas + Depósitos Piroclásticos	Santa Rita (na Serra de Santiago)

Quadro XLVII – Susceptibilidades ao Incremento da Intrusão Salina, Escoamento Superficial e Estiagem em Condições de Alteração dos Regimes de Precipitação: Índícios Provisórios

Região da Ilha	Sistemas Aquíferos	Susceptibilidade ao Aumento de		Susceptibilidade à Estiagem
		Intrusão Salina	Escoamento Superficial	
Serra do Cume	Serra do Cume	Não susceptível	Muito susceptível	Muito susceptível
Serra da Ribeirinha	Ribeirinha	Susceptível a muito susceptível (*)	Muito pouco susceptível	Muito susceptível
Lajes	Graben	Muito susceptível (*)	Muito pouco susceptível	Muito susceptível
	Ignimbritos das Lajes	Susceptível a muito susceptível (*)	Muito pouco susceptível	Susceptível
Serra de Santiago	Serra de Santiago	Susceptível a muito susceptível (*)	Muito pouco susceptível	Muito susceptível
Guilherme Moniz Pico Alto; Cinco Picos	Caldeira Guilherme Moniz-São Sebastião	Muitíssimo susceptível (*)	Muito pouco susceptível	Pouco susceptível
	Caldeira Guilherme Moniz-São Sebastião (Cabrito) (A)	Não susceptível	Muito pouco susceptível	Muito susceptível
	Central	Susceptível a pouco susceptível (*)	Susceptível	Susceptível (1)
	Labaaçal-Quatro Ribeiras	Susceptível a muito susceptível (*)	Susceptível	Pouco susceptível (1)
Zona de Transição	Biscoitos-Terra Chã	Muito susceptível	Muito pouco susceptível	Pouco susceptível
Santa Bárbara	Santa Bárbara Superior	Não susceptível	Muito pouco susceptível	Muito susceptível
	Santa Bárbara Inferior	Susceptível a pouco susceptível (*)	Muito susceptível	Pouco susceptível

(*) válido apenas para a região basal; os aquíferos suspensos não são afectados; (1) localmente, alguns níveis produtivos muito superficiais podem ser bastante susceptíveis; (A) refere-se exclusivamente à área do sector do Cabrito.

O Quadro XLVII foi obtido relacionando de forma essencialmente qualitativa:

- ◆ ***Para a susceptibilidade à intrusão salina*** – a informação conhecida sobre as permeabilidades das formações, em especial nos sectores basais dos maciços, embora os dados actuais sobre este sector sejam ainda muito escassos e não permitam uma correcta avaliação das suas propriedades hidráulicas em toda a sua zona de contacto com o mar. As zonas muito permeáveis foram consideradas áreas muito susceptíveis dado o avanço da interface água doce/água salgada poder ocorrer mui rapidamente. Nesta situação estão as formações basálticas e de brecha recente como o sistema aquífero da Terra Chã-Biscoitos, o de Guilherme Moniz-S. Sebastião ou o sector de Biscoitos no sistema aquífero Labaçal-Quatro Ribeiras, em especial onde as formações apresentam tubos de lava e grandes vacúolos. Os sistemas aquíferos que estão isolados do mar e/ou localizados em altitude (ex.: Serra do Cume, Santa Bárbara Superior) foram considerados não susceptíveis, dado a sua localização não os colocar em contacto com o mar, nem mesmo se se considerarem os cenários de subida do nível do mar, enunciados no Anexo 1. Note-se que no caso de Santa Bárbara Superior, pontualmente alguns níveis entram em contacto com o mar⁸¹ mas para o comportamento geral deste sistema aquífero foram considerados como não significativos. Para os sistemas aquíferos em contacto com o mar, consideram-se como não susceptíveis os níveis aquíferos suspensos, daí a ressalva no quadro em relação a estes níveis. As classes consideradas foram:
 - ◆ ***Muitíssimo a muito susceptível*** – litologias muitíssimo permeáveis (K > 1 000 m/d);
 - ◆ ***Muito susceptível*** – litologias muito permeáveis a permeáveis (neste último caso com tubos de lava relativamente comuns);
 - ◆ ***Susceptível a muito susceptível*** – litologias permeáveis a muito permeáveis (neste último caso sem tubos de lava);
 - ◆ ***Susceptível a pouco susceptível*** – litologias permeáveis (K entre 10 e 100 m/d);
 - ◆ ***Não susceptível*** – sempre que os aquíferos não têm qualquer contacto com o mar ou são pouco permeáveis.
- ◆ ***Para a susceptibilidade ao escoamento superficial*** – a informação relativa à densidade de drenagem (obtida a partir dos mapas topográficos) e à permeabilidade. Consideraram-se como muito susceptíveis as áreas que actualmente possuem alto escoamento superficial, dado serem regiões de elevado NC e, segundo os resultados apresentados no Capítulo 5, são as que registam maiores alterações no escoamento para os diferentes cenários de alteração climática. Ao invés, e também de acordo com os resultados do Capítulo 5, as áreas de escoamento superficial nulo não são afectadas pela alteração das condições climáticas e portanto não serão susceptíveis. As zonas de escoamento mediano apresentam no geral um comportamento de evolução moderado, fortemente dependente da vegetação (que não é analisada neste caso, uma vez que pouco se conhece sobre a variação da vegetação nos vários cenários de alteração climática), e por isso são classificadas como susceptíveis. As classes consideradas foram:

⁸¹ Em particular se se considerar a geometria individual destes níveis produtivos e a orientação geral do fluxo de água.

- ◆ **Muito pouco susceptível** – densidade de drenagem $< 0,8 \text{ km/km}^2$ (com frequência nula); muitíssimo a muito permeável;
 - ◆ **Pouco susceptível** – densidade de drenagem entre $0,8$ e $1,3 \text{ km/km}^2$;
 - ◆ **Susceptível** – densidade de drenagem entre $0,8$ e $1,3 \text{ km/km}^2$;
 - ◆ **Muito susceptível** – densidade de drenagem $> 2 \text{ km/km}^2$; formações de permeabilidade moderada a pouco permeáveis.
- ◆ **Para a susceptibilidade à estiagem** – a permeabilidade, área, capacidade de armazenamento e superficialidade dos aquíferos. Aquíferos muito pouco permeáveis e/ou de área reduzida, logo com reduzida capacidade de recarga, consideraram-se como muito susceptíveis. Aquíferos muito permeáveis mas de área reduzida, logo com tempos de residência curto (Ex.: Cabrito) são também considerados muito susceptíveis. Aquíferos de grande extensão lateral e permeabilidade elevada, a que se associa moderada a grande capacidade de armazenamento consideraram-se no geral pouco susceptíveis, embora níveis mais superficiais e de menores dimensões possam apresentar uma maior susceptibilidade. Aquíferos de extensão mediana e capacidade de armazenamento moderada a alta consideraram-se de susceptibilidade média, ou seja, susceptíveis. As classes para esta susceptibilidade foram já definidas no sub-capítulo 6.4.1. (cf. pg. 164 e Quadro XLV), sendo:
- ◆ **Muito susceptível** – área $< 24 \text{ km}^2$; armazenamento moderado a baixo, podendo ser alto em aquíferos de área muito reduzida ($< 7 \text{ km}^2$); pouco a muito permeável; em termos de superficialidade os aquíferos são muito superficiais, podendo ser medianamente superficiais se a capacidade de armazenamento for baixa e a área inferior a 20 km^2 .
 - ◆ **Susceptível** – área de 24 km^2 a 50 km^2 ; armazenamento moderado; permeável a muito permeável; em termos de superficialidade os aquíferos são superficiais (se a permeabilidade não for muito elevada) a medianamente profundos.
 - ◆ **Pouco susceptível** – área $> 50 \text{ km}^2$; armazenamento moderado a alto. A superficialidade dos aquíferos é no geral “Profundo” podendo ser “Superficial a Muito superficial” se a capacidade de armazenamento for elevada e a área também elevada.

6.6. Propriedades dos Aquíferos, Sua Resposta às Alterações Climáticas e seu Condicionamento da Recarga

Neste capítulo são apresentados os resultados da análise da resposta dos aquíferos às alterações climáticas em função das suas características intrínsecas e climatologia a que estão sujeitos. Como ponto de partida para esta análise caracterizou-se o comportamento dos sistemas hidrogeológicos em função do seu grau de alteração e litologias versus recarga, tentando-se definir zonas preferenciais de infiltração; posteriores trabalhos de campo serão necessários para pormenorizadamente melhor delimitar estas zonas preferenciais de infiltração. Definiu-se, com base na informação tratada neste Capítulo, quadros relacionais entre idades, litologias, permeabilidades,

tipos de aquíferos e localização versus alterações da capacidade de infiltração para cada cenário de alteração climática, excluindo da análise os eventos extremos, dado que a sua tendência de evolução não é ainda conhecida para os Açores. A partir destes conhecimentos aborda-se a alteração dos valores de escoamento superficial e recarga para cada cenário de alteração climática em função do tipo de litologia e respectivo grau de alteração, procurando-se definir: (1) a variação das recargas e escoamento superficial para cada sistema aquífero, (2) áreas onde se registam estas variações, incluindo a definição de potenciais novas zonas de recarga ou de improdutividade, tanto para eventos climáticos médios como eventos extremos, (3) modificação, face às diferentes condições de recarga impostas por cada cenário de alteração climática, da distribuição e extensão das zonas preferenciais de recarga e de descarga, assim como das regiões não produtivas, (4) os sistemas aquíferos/litologias mais afectados por estas modificações.

Será importante, no futuro, fazer a relação entre a alteração dos materiais constituintes do meio aquífero com os diferentes paleoclimas mais ou menos húmidos que actuaram sobre as ilhas, por forma a verificar qual a evolução das propriedades hidráulicas em função dos processos de alteração definidos pelos paleoclimas. Contudo na fase actual dos conhecimentos não é possível definir esta relação meteorização/paleoclimas versus alteração das propriedades hidráulicas dos materiais.

Como porém os cenários de alteração climática actuais fazem previsões apenas até 2100 e 100 anos é um tempo demasiado reduzido para a meteorização dos materiais possa ser significativa, pelo menos em termos de modificação das suas propriedades hidráulicas, considerou-se que, para o presente estudo, a análise dos efeitos paleoclimáticos sobre o comportamento dos materiais não se afigura necessária.

6.6.1. DEFINIÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE TIPOS DE AQUÍFEROS E IDADES VERSUS ALTERAÇÃO DA CAPACIDADE DE INFILTRAÇÃO PARA CENÁRIOS DE ALTERAÇÃO CLIMÁTICA

No estado actual dos conhecimentos o estabelecimento de relações entre idades, litologias e permeabilidade é ainda difícil de realizar, tanto mais que as várias litologias reagem de formas algo distintas aos processos de alteração, e portanto a relação idades-estado de alteração-permeabilidade não é directa nem linear. A correlação com as alterações da capacidade de infiltração em função das alterações climáticas é ainda mais complexa, pelo que esta última não foi ainda abordada. Para realizar tais correlações seria necessário conhecer a evolução da alteração dos materiais e das suas propriedades hidráulicas em função da evolução dos paleoclimas, e realizar ensaios de alteração dos materiais para diferentes cenários de alterações climáticas, que simulassem ao mesmo tempo a passagem do tempo. Por razões monetárias e logísticas não foi possível realizar tais ensaios. Contudo, dado que os actuais cenários de alteração climática abrangem um espectro de apenas 100 anos, e, com base nas observações do estado de alteração das formações vulcânicas mais recentes (centenas a alguns milhares de anos de idade) assim como nas variações de clima que ocorreram durante esses períodos, os processos de meteorização para a região geográfica em que os Açores se situam são demasiado lentos para nesse curto espaço de tempo geológico imprimirem modificações drásticas nas propriedades hidráulicas dos materiais (embora seja de prever a ocorrência de alterações

Análise das Características Intínsecas dos Vários Sistemas Hidrogeológicos Insulares e sua Resposta à Alterações Climáticas

mais subtis), consideraram-se tais propriedades hidráulicas como constantes. Contudo tais alterações subtis (basicamente porque o tempo envolvido é curto) devem ser estudadas pois podem ainda assim ter impactos nos regimes de circulação subterrânea. Deste modo, e só para lançar as fundações para futuros estudos nesta matéria, fez-se uma correlação entre as idades das formações, os tipos litológicos, respectivas permeabilidades, que se apresenta no Quadro XLVIII.

Este quadro foi obtido cruzando a informação disponível nas cartas geológicas sobre a idade e tipos de litologias, as permeabilidades conhecidas e o que é sabido em termos de evolução das porosidades das unidades piroclásticas e lávicas ao longo do tempo, cruzado com a informação obtida no Capítulo 5.

Deste quadro pode concluir-se que as formações recentes tendem a ver a permeabilidade aumentar com a alteração, sejam elas lavas ou piroclastos e que portanto, regra geral, as áreas onde ocorrem tenderão a tornar-se zonas de maior infiltração, podendo tornar-se mesmo zonas preferenciais de recarga. Para as formações menos recentes a evolução é um pouco mais complexa. Se no geral as escoadas lávicas aflorantes na ilha Terceira com as idades acima referidas e os ignimbritos tendam a ver a permeabilidade aumentar com o decorrer da alteração, para os piroclastos mal calibrados e para a grande maioria dos piroclastos, a permeabilidade tende a reduzir-se. As formações da ilha Terceira aflorantes (e que constituem a zona de infiltração) são muito recentes, estando a sua evolução ainda numa fase em que o alargamento das fracturas e a curta evolução da alteração dos materiais conduz na sua globalidade a um aumento do número de vazios. Para formações mais antigas, que ocorrem apenas noutras ilhas, esta evolução inverte a partir de um dado estágio evolutivo.

Quadro XLVIII – Correlação entre Litologias, Estado de Alteração, Idades e Permeabilidade com Resposta da Capacidade de Infiltração versus Alterações Climáticas

Idade e Estado de Alteração	Tipo Litológico Predominante	Permeabilidade	Capacidade de Infiltração	Sistemas Aquíferos
0 a 20 000 anos Muito Pouco a Pouco Alterado	Lávico basáltico com tubos de lava abundantes e bem desenvolvidos e/ou muito escoriáceos; as unidades piroclásticas são secundárias	Muitíssimo permeável	Aumenta	Guilherme Moniz-São Sebastião
		Muito permeável		Santa Bárbara Superior
	Ignimbritos e outras unidades piroclásticas bem calibradas e mal consolidadas	Muito permeável	Aumenta	Ignimbritos das Lajes
20 000 a 75 000 anos Medianamente a pouco alterado	Lávico basáltico com tubos de lava abundantes e bem desenvolvidos e/ou escoriáceos; unidades piroclásticas por vezes com alguma representação	Permeável a muito permeável	Aumenta (1)	Labaçal-Quatro Ribeiras
		Muito permeável		Biscoitos-Terra Chã
	Lávico basáltico pouco escoriáceo e/ou sem fracturação ou tubos de lava significativos; unidades piroclásticas com alguma representação	Muito permeável a permeável	Aumenta (1)	Ribeirinha
		Permeável		Serra de Santiago Santa Bárbara Inferior
	Ignimbritos e outros piroclastos bem calibrados e mal consolidados; com intercalações de unidades lávicas	Muito permeável	Aumenta (1)	Graben
Permeável	Central			
Piroclastos s.l. e/ou pomitos mal calibrados, consolidados; as unidades lávicas são secundárias	Moderada a pouco permeável	Reduz	Serra do Cume	

(1) No caso das unidades piroclásticas a sua evolução ao longo do tempo pode ser no sentido da redução da permeabilidade.

Deve referir-se que nalgumas unidades lávicas mais antigas a colmatação das fracturas observada pode contrariar e sobrepor-se ao efeito de abertura da fracturação existente.

6.6.2. CARACTERIZAÇÃO DA RESPOSTA DOS SISTEMAS AQUÍFEROS FACE À RECARGA

Conforme se viu no Capítulo 5 (cf. Figs. 35 e 36) para cenários de alteração da precipitação, além dos sectores de permeabilidade máxima (não escoamento superficial) as áreas mais favoráveis à recarga são as de escoamento superficial moderado e de coberto vegetal herbáceo. Se se considerar a variação da evapotranspiração verifica-se que a menor variação na recarga se dá nos sectores de escoamento superficial moderado e coberto vegetal herbáceo, enquanto que as zonas de escoamento superficial muito elevado e coberto arbóreo são as que mostram uma maior variação nos valores das recargas (cf. Figs. 55 e 56).

Assim perante uma variação positiva da precipitação os sistemas aquíferos de elevada permeabilidade e que preferencialmente tenham um coberto vegetal de reduzida a mediana extensão radicular são os que respondem mais favoravelmente, armazenando as maiores proporções de recarga. Isto favorece sobretudo os sistemas aquíferos sitos em bacias endorreicas e onde se não verifique praticamente escoamento (ex.: Graben, Guilherme Moniz-S. Sebastião) ou aquelas áreas de escoamento superficial reduzido e com coberto vegetal herbáceo (ex.: sectores de Serra de Santiago ou do Central).

Por seu lado os sistemas onde o escoamento superficial é elevado, os incrementos na recarga são moderadamente baixos, para os cenários de subida da precipitação (Fig. 35), verificando-se que para os terrenos impermeáveis com espessuras radiculares muito baixas a variação das recargas é a mais reduzida, em particular nos cenários de descida de precipitação.

No que se refere à evapotranspiração o comportamento é um pouco mais complexo, mas parece ser sobretudo controlado pelos aspectos relativos à vegetação, mais do que às propriedades intrínsecas dos aquíferos. Tipicamente, as áreas de coberto vegetal arbóreo em particular se associadas a solos de permeabilidade muito baixa, são as que registam maiores variações de recarga face às variações da evapotranspiração, ao passo que as áreas que mantêm uma recarga mais constante são as de permeabilidade moderada a baixa e coberto vegetal de tipo herbáceo.

6.6.2.1. RESPOSTA DA LITOLOGIA À RECARGA VERSUS IDADE E PROPRIEDADES HIDRÁULICAS

Verifica-se que a permeabilidade dos aquíferos é dependente do estado de alteração, logo da idade das formações. Como se vê nos Quadros XLII e XLVIII, as formações mais recentes constituem os sistemas aquíferos dos Ignimbritos das Lajes, Serra de Santiago, Santa Bárbara Superior e Guilherme Moniz-S. Sebastião, e têm alta permeabilidade (cf. Quadro XXXVI). Na ilha Terceira as formações são todas de idades bastante recentes, e o grau de alteração não é muito elevado na generalidade dos casos.

No entanto verifica-se que as formações piroclásticas mais recentes (ex.: formações do sistema Ignimbritos das Lajes) ou as formações lávicas basálticas muito recentes com grandes níveis de escórias, densamente fracturadas e/ou com muitos tubos de lava são as mais permeáveis e deste modo, as que melhor tendem a acomodar um aumento da recarga no caso dos cenários de subida das precipitações.

As formações menos permeáveis, isto é, as que em cenários de alteração da precipitação tendem a ter comportamentos menos favoráveis à recarga, são formações piroclásticas com alguma alteração, com permeabilidade relativamente reduzida, que costumam estar associadas a sequências de lavas + piroclastos e relevos com alguma expressão (ex.: Serra do Cume, Santa Bárbara Inferior). Assim, formações abaixo dos 19 mil anos, piroclásticas, em especial se mal calibradas, ou escoadas lávicas e piroclásticas de idades similares (ex.: sistemas Graben ou Lapaçal-Quatro Ribeiras) têm permeabilidades um pouco mais baixas (cf. Quadro XXXVI) quando comparadas com as formações mais recentes, e em situação de aumento de precipitação tenderão a ter um comportamento comparativamente mais favorável ao escoamento (cf. Figs. 35 e 36).

6.6.3. CONCLUSÕES

Este capítulo teve por objectivo prioritário reflectir sobre os aspectos da susceptibilidade dos aquíferos às alterações climáticas a partir do aspecto das suas propriedades intrínsecas, constituindo-se numa primeira abordagem a um problema complexo e ainda pouco investigado, estando por esta razão confinada a uma avaliação qualitativa destes processos. É assim um ponto de partida para o que se considera serem necessários estudos quantitativos – tanto de campo como laboratoriais – sobre a evolução e resposta das propriedades intrínsecas dos aquíferos às alterações climáticas. Por exemplo, aspectos como a idade das formações e a sua alteração, em particular se associados com os diferentes tipos de climas que se sucederam ao longo do tempo de existência da formação (e o período de duração de cada tipo de paleoclima), deveriam ser estudados em detalhe de modo a compreender as inter-relações entre a evolução do estado de alteração com a permeabilidade, de forma o mais possível quantitativa, e com a sucessão dos diferentes paleoclimas afecta a evolução desta permeabilidade, que é, afinal um factor importante na resposta dos aquíferos às alterações climáticas.

No estado actual dos conhecimentos, e considerando a informação ao longo de todo o capítulo, é possível definir que as zonas de recarga preferencial poderão incluir não apenas as de escoamento superficial nulo, mas as de escoamento superficial baixo e cobertura vegetal herbácea poderão passar a desempenhar maior papel na recarga dos aquíferos. Em contrapartida as áreas de permeabilidade baixa tenderão a sofrer maior variação das recargas em função da variação das condições de precipitação, e da evapotranspiração muito em particular, a qual está directamente dependente da evolução das temperaturas atmosféricas.

Entre os novos estudos a considerar para trabalhos futuros sugerem-se ainda estudos de campo detalhados, associados a simulações por modelos matemáticos, para definição em termos de definição geográfica e caracterização hidrogeológica das novas zonas de recarga, escoamento superficial e descarga, assim como para a definição dos

Análise das Características Intínsecas dos Vários Sistemas Hidrogeológicos Insulares e sua Resposta à Alterações Climáticas

graus de impacto das alterações da recarga sobre os aquíferos nos vários cenários de alteração climática.

7. RESPOSTA DOS SISTEMAS AQUÍFEROS À ALTERAÇÃO DO NÍVEL DO MAR COMO RESULTADO DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS

Neste capítulo analisa-se a influência das alterações climáticas sobre a susceptibilidade dos aquíferos insulares de base à intrusão salina. Esta influência, que é originada pela alteração do nível do mar, cujos cenários foram definidos e analisados no Anexo 1 e que se apresenta nos Quadros XLIX e L, tem uma maior ou menor expressão em função das propriedades intrínsecas dos materiais constituintes dos aquíferos costeiros e/ou basais. No presente capítulo pretende-se analisar de forma genérica os efeitos da alteração do nível do mar, em particular sobre o problema da intrusão salina, considerando os cenários de alteração do nível do mar do Anexo 1 mas entrando em conta com a idade (e portanto estado de alteração) das formações e respectivas propriedades hidráulicas por forma a definir para as condições reais da ilha Terceira, os diferentes avanços da cunha salina e os possíveis riscos de intensificação deste avanço. Procura-se também identificar quais as regiões onde os seus efeitos poderão ser mais sentidos.

A discussão da análise das modificações do nível do mar na ilha Terceira é apresentada no Anexo 1, mas para simplicidade de leitura apresentam-se aqui os resultados da evolução do nível do mar no marégrafo de Angra do Heroísmo (Quadros XLIX e L e Figs. 57 a 62), pois estes são os dados de partida para a simulação da intrusão salina.

Quadro XLIX – Tendências de Evolução do Nível do Mar (em mm/ano) a partir dos Registos de Marégrafos

Estações	Série total	Série 1933 a 1962	Série 1976 a 1985	
Angra do Heroísmo – séries mensais	-2,21	6,34	15,22	6,25 (4)
Angra do Heroísmo – séries anuais	-2,20	6,35	12,75	5,67 (4)

(4) Série 1976 a 1996

Quadro L – Tendências de Evolução do Nível do Mar (em cm ao fim de 100 anos) a Partir dos Registos de Marégrafos

Estações	Série total	Série 1933 a 1962	Série 1976 a 1985	
Angra do Heroísmo – séries mensais	-22,1	63,4	152,2	62,5 (4)
Angra do Heroísmo – séries anuais	-22,0	63,5	127,5	56,7 (4)

(4) Série 1976 a 1996

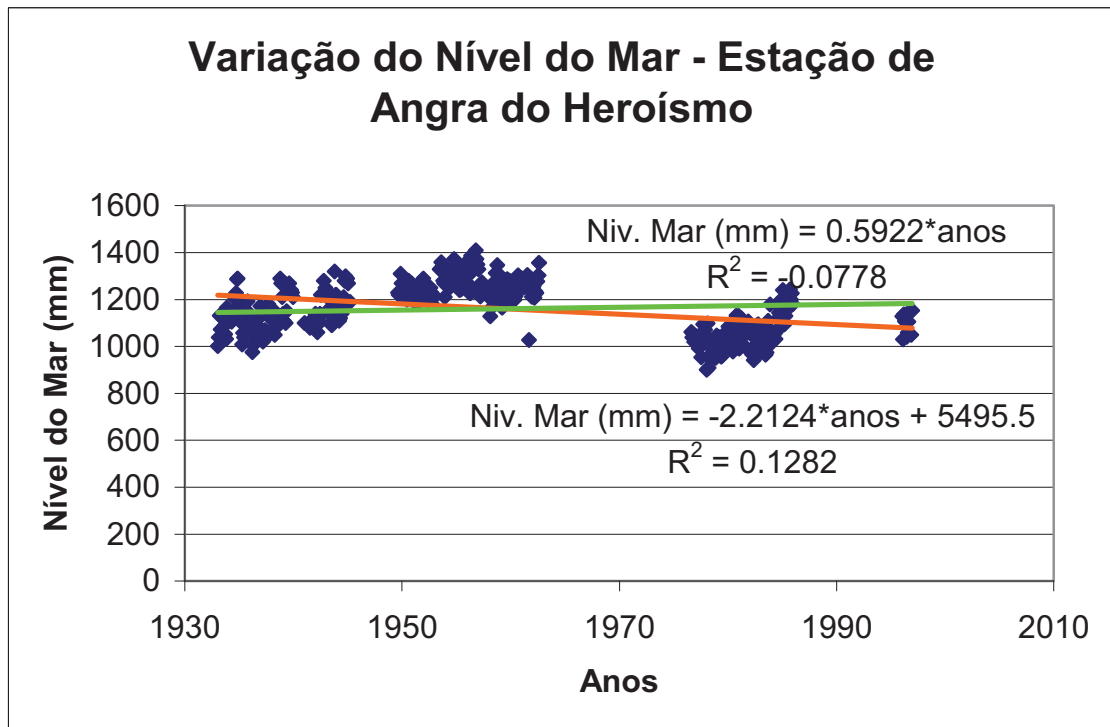


Figura 57 – Evolução do Nível do Mar em Angra do Heroísmo – totalidade da série, valores mensais

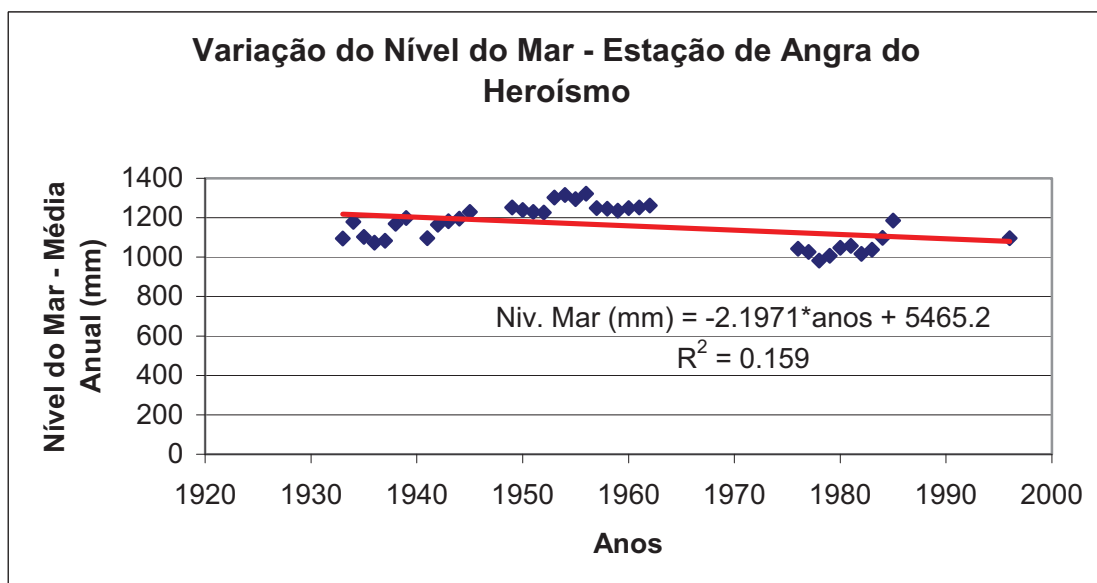


Figura 58 – Evolução do Nível do Mar em Angra do Heroísmo – totalidade da série, valores anuais

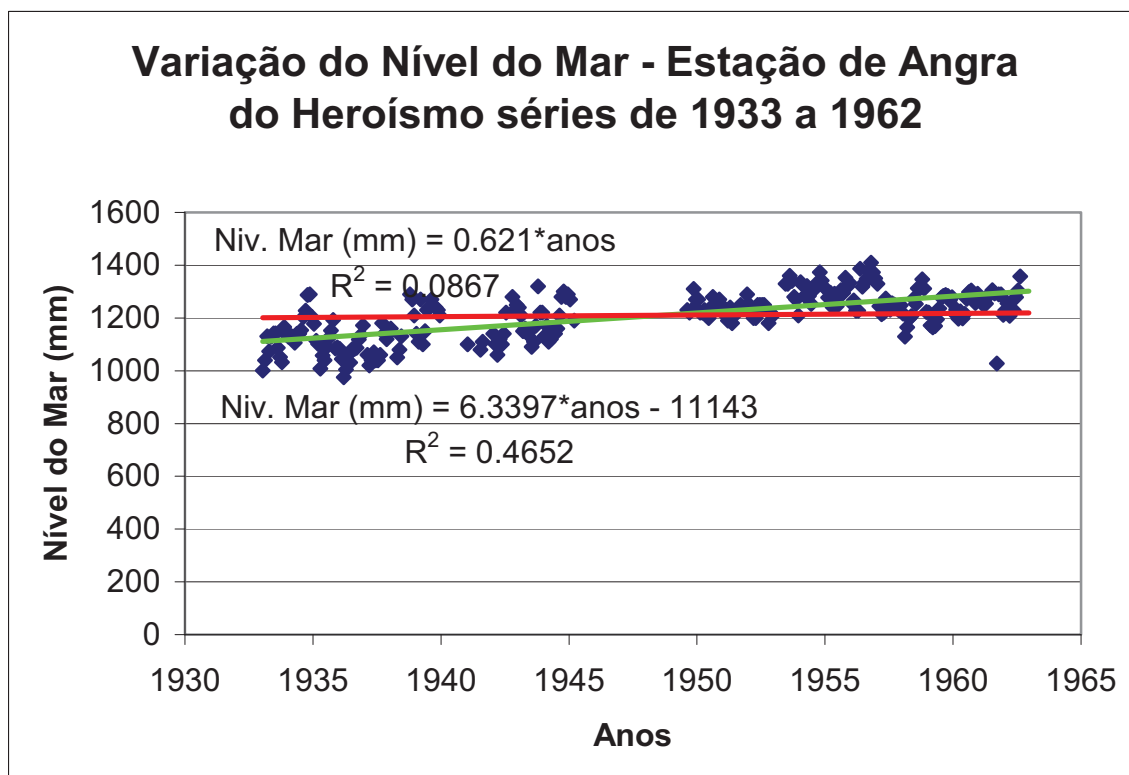


Figura 59 – Evolução do Nível do Mar em Angra do Heroísmo – série de 1933 a 1962, valores mensais

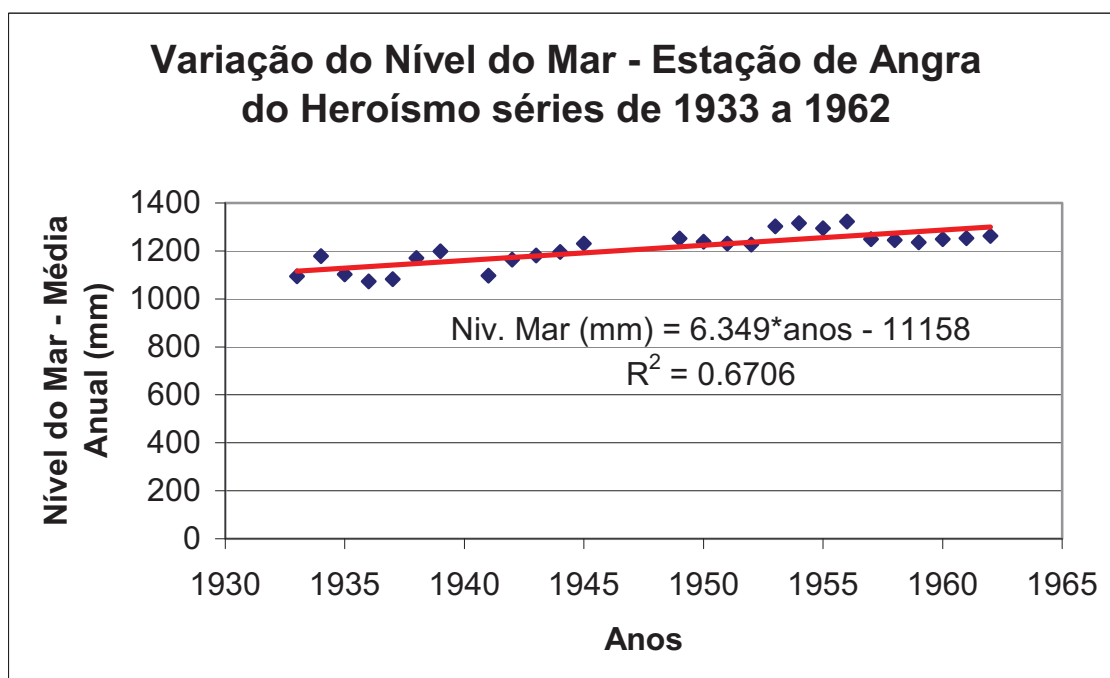


Figura 60 – Evolução do Nível do Mar em Angra do Heroísmo – série de 1933 a 1962, valores anuais

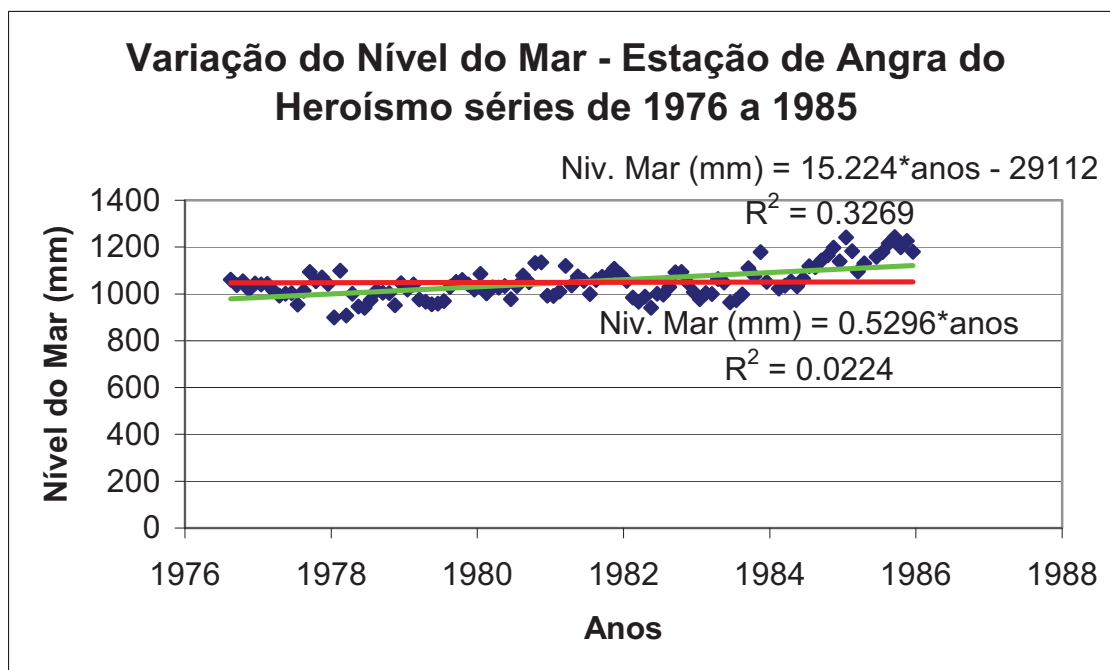


Figura 61 – Evolução do Nível do Mar em Angra do Heroísmo – série de 1976 a 1985, valores mensais

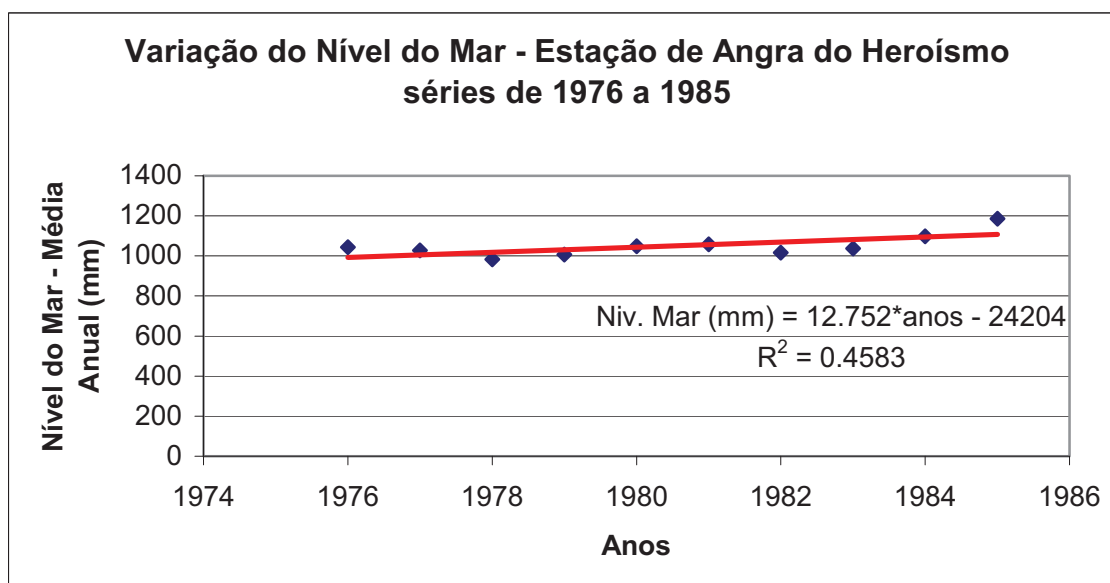


Figura 62 – Evolução do Nível do Mar em Angra do Heroísmo – série de 1976 a 1985, valores anuais

O objectivo final é o de determinar os impactos sobre os recursos hídricos provocados pela subida do nível do mar, correlacionando estas alterações com os tipos de aquíferos e graus de alteração dos materiais constituintes, além dos provocados pelas alterações da precipitação e temperatura, nos cenários climáticos considerados. Esta análise pretende ser puramente quantitativa, deixando de parte os aspectos da alteração na qualidade das águas subterrâneas que possam ser induzidas tanto pela intrusão salina

como pelos novos regimes de precipitação e temperaturas, dado que não só este campo, de per si, é suficientemente vasto para desenvolver numerosos trabalhos como pela falta de dados suficientes sobre a qualidade das águas da franja costeira dos sistemas aquíferos da ilha Terceira.

7.1. Caracterização da Resposta dos Sistemas Aquíferos de Base Face à Intrusão Salina

A partir do discutido nos Capítulo 3 e Anexo 1 sobre zonas potencialmente inundáveis que podem ser perdidas por subida do nível do mar, e considerando apenas o cenário mais catastrófico, verifica-se que estas zonas correspondem à totalidade ou praticamente à totalidade das áreas de praia (cf. Anexo 1), o que constitui uma redução do volume potencialmente disponível para o armazenamento de água doce, dado que, com o recuo do litoral, a interface água doce/água salgada terá forçosamente de se deslocar para o interior da ilha. Para a ilha Terceira o recuo da única praia de areia minimamente importante é dado no Quadro LI⁸².

Quadro LI – Recuo da Linha de Costa nas Praias de Areia da ilha Terceira

Praia	Taxa de Recuo da Linha de Costa (%)							
	Cenário 1 (1)				Cenário 2 (2)			
	n.m.+ 1,5 m	n.m.+ 0,5 m	n.m.+ 0,15 m	n.m.+ 0,05 m	n.m.+ 1,5 m	n.m.+ 0,5 m	n.m.+ 0,15 m	n.m.+ 0,05 m
Praia da Vitória	50	17	5	1,7	100	67	20	6,7

(1) linha de costa recua 50 x subida do nível do mar, (2) linha de costa recua 200 x subida do nível do mar; 25% - equivale à desapareição de ¼ da praia, 50% - equivale à desapareição de ½ da praia, 100% - equivale à desapareição total da praia

Quanto às zonas potencialmente afectadas pela intrusão salina, será ainda necessário realizar um estudo complementar de simulação, utilizando dados de permeabilidade das formações litorais da ilha Terceira. Na fase actual dos conhecimentos, a caracterização detalhada das permeabilidades desta zona, necessária para uma correcta modelação da intrusão salina, está ainda numa fase incipiente considerando-se como fora do âmbito desta tese proceder aos estudos que permitam tal caracterização (execução de piezómetros, ensaios de caudal, etc.). Pretende-se no entanto estabelecer cenários de permeabilidade – a partir por exemplo dos dados fornecidos no Quadro LIV – que reflectam as permeabilidades das formações litorais e, com estes valores, simular a intrusão salina para os cenários de subida do nível do mar admitidos neste estudo.

Em face dos actuais conhecimentos, apenas é possível definir os aquíferos de base que mostram maior risco à intrusão salina (Quadro LII) para a ilha Terceira, sem contudo definir as áreas exactas nem os seus limites precisos em que este problema poderá causar impactos. A gradação desta susceptibilidade foi já referenciada no Quadro XLVII.

⁸² Por aplicação dos limites de variação máximos e mínimos considerados pela Regra de Bruun (1988).

Quadro LII – Sistemas Aquíferos Passíveis de Sofrer Intrusão Salina

Região da Ilha	Sistemas Aquíferos
Cinco Picos; Guilherme Moniz	Caldeira Guilherme Moniz-São Sebastião
Serra da Ribeirinha	Ribeirinha
Lajes	Graben Ignimbritos das Lajes
Serra de Santiago	Serra de Santiago
Guilherme Moniz-Pico Alto; Cinco Picos	Central Labaçal-Quatro Ribeiras
Zona de Transição	Biscoitos-Terra Chã
Santa Bárbara	Santa Bárbara Inferior

Este quadro, como se vê, assinala apenas os sistemas aquíferos que estão em contacto com o mar, e deste modo, podem sofrer os efeitos das variações do nível do mar sobre os seus aquíferos/níveis produtivos basais. A susceptibilidade destes aquíferos, em termos puramente qualitativos é baseada simplesmente em valores médios de permeabilidade conhecidos para os mesmos e foi, como se disse, apresentada no Quadro XLVII.

A modelação do comportamento das litologias à intrusão salina para as várias litologias (e variadas propriedades hidráulicas) nas diferentes condições dos vários cenários de alteração do nível do mar pode ser realizada por um conjunto de modelos numéricos, do qual se destaca o modelo FEFLOW (DIERSCH, 1998). A questão da intrusão salina tem sido estudada por vários autores, a nível internacional e nacional, cintando-se apenas, por impossibilidade de referir toda a bibliografia nacional sobre esta matéria, o projecto FCT “Valorização e Protecção da Zona Costeira Portuguesa: Avaliação e Estudo da Vulnerabilidade de Sistemas Aquíferos Costeiros - Componente Águas Subterrâneas” e os trabalhos de Diamantino e Lobo Ferreira (1996) ou Diamantino (1996).

7.1.1. RESPOSTA DA LITOLOGIA À INTRUSÃO SALINA VS. IDADE E PROPRIEDADES HIDRÁULICAS

Verificou-se nos capítulos anteriores que as propriedades hidráulicas dependem da idade das formações e das suas estruturas internas. A propriedade intrínseca do aquífero que mais controla a intrusão salina é a permeabilidade. O nível de água no aquífero, o outro factor determinante no controle da intrusão salina, depende do balanço recargas e extracções realizadas para satisfazer os consumos humanos. Neste sub-capítulo focam-se apenas as propriedades intrínsecas dos aquíferos, deixando a questão das extracções para capítulo posterior (onde se analisará o stress hídrico sobre os aquíferos para os vários cenários de alteração climática).

Sendo a permeabilidade o factor intrínseco mais importante na intrusão salina, e que no geral quando a alteração é elevada a permeabilidade diminui significativamente, considerando os efeitos de fenómenos hidrotermais, alteração e compactação das formações, assim como a actividade tectónica que pode abrir condutas preferenciais de circulação, emerge um quadro de forte anisotropia e heterogeneidade da distribuição das permeabilidades nos aquíferos basais, quer no seu interior quer ao longo da faixa

costeira, levando a um expectável comportamento diferencial da intrusão salina pelo efeito de uma subida do nível do mar. A isto acresce ainda a muito pouca espessura deste aquífero, sendo desconhecido o efeito que uma modificação do nível do mar (em especial no caso de subida) pode impor a um aquífero nestas condições. No caso da ilha Terceira, e para a generalidade dos aquíferos⁸³, as permeabilidades parecem ser no geral moderadas a altas, por vezes mesmo muito altas, dadas as idades recentes, em termos gerais, das formações e a sua alteração moderada a baixa. Isto faz com que a maioria dos sistemas aquíferos seja bastante susceptível a sofrer intrusão salina, como se pode ver dos Quadros LII e LIV. Os aquíferos mais susceptíveis serão assim os muito recentes, preferencialmente lávicos com grandes fracturas e alta densidade de fracturação e escórias, cujas fracturas e vazios não estejam ainda colmatados. Deste modo, os aquíferos lávicos muito recentes (como os sectores dos aquíferos basais que pertençam aos sistemas de Guilherme Moniz-S. Sebastião, Biscoitos-Terra Chã ou Santa Bárbara Inferior e que possuam tais litologias) serão particularmente susceptíveis, seguindo-se os aquíferos piroclásticos muito recentes (ex.: Ignimbritos das Lajes).

A susceptibilidade à intrusão salina é assim admissivelmente mais elevada nos sistemas aquíferos que apresentem elevadas infiltrações (sinal de permeabilidades elevadas) e muito em especial nas zonas onde ocorram tubos de lava, dado estas estruturas serem corredores de acesso preferencial da água do mar ao interior dos aquíferos. A existência de tubos de lava pode inclusive sobrepor-se ao factor idade, e tornar formações mais antigas mas com tubos de lava abertos (não preenchidos, não colapsados, etc.), tanto ou mais permeáveis que outra mais recentes e compactas. Um exemplo disso é o caso do sistema de Biscoitos-Terra Chã, que apesar de mais antigo (cf. Quadro XLVIII), tem uma permeabilidade tão elevada quanto o Ignimbrito das Lajes (cf. Quadro XXXVI).

As unidades piroclásticas de maior idade (ex.: Graben) têm no geral permeabilidades que as tornam menos susceptíveis à intrusão salina, o que, contudo, não implica que não a possam sofrer e, no caso das formações da ilha Terceira, uma evolução similar pode ser apresentada para as formações lávico+piroclásticas (ex.: sistema de Labaçal-Quatro Ribeiras).

Deste modo, nesta análise qualitativa, baseada nas características litológicas das formações e nos restritos dados conhecidos de permeabilidades e transmissividades pode indicar-se como zonas prováveis mais em risco em termos de intrusão salina: Biscoitos-Terra Chã (nos sectores litorais, em particular a região de Biscoitos), Guilherme Moniz-S. Sebastião (em especial a zona de S. Sebastião), Ignimbritos das Lajes (no sector litoral) e Graben. Deve contudo ter-se sempre em mente, que esta é uma primeira avaliação qualitativa, logo muito limitada, que estes são meios altamente heterogéneos e portanto os avanços da cunha salina devidos a uma alteração do nível do mar podem ser grandemente variáveis de sector para sector destes sistemas aquíferos e que será necessário, em futuros estudos, realizar um zonamento detalhado das propriedades hidráulicas do modelo assim como do estado actual da intrusão salina, de

⁸³ De acordo com os dados existentes, os quais são manifestamente poucos para caracterizar um meio tão heterogéneo quanto o desta ilha vulcânica.

modo a poder realizar-se uma modelação fundamentada da intrusão salina nos aquíferos costeiros/de base da ilha para diferentes cenários de alteração do nível do mar.

A simulação dos processos de intrusão salina, necessária quer para uma análise de pormenor de fenómeno nestes meios heterogéneos, quer para a análise de cenários e eventuais medidas de gestão a serem tomadas em condições de alterações climáticas (e nível do mar), eiva assim de diversas dificuldades dados os limitados conhecimentos quantitativos das propriedades hidráulicas e a sua variabilidade (zonamento) ao longo de toda a faixa costeira dos sistemas aquíferos da Terceira. São assim necessários três tipos de cenários no desenvolvimento de estudos posteriores de intrusão salina num quadro de alteração do nível do mar: (1) cenários de recargas (simulam as alterações na precipitação e condições de evapotranspiração, directamente relacionadas com as modificações atmosféricas associadas às alterações climáticas), (2) cenários de propriedades hidráulicas, os quais podem ser simplificados a diferentes tipos de litologias, e das quais existam dados sobre as suas propriedades hidráulicas, (3) cenários de variação do nível do mar (alguns destes podem ser encontrados no Anexo 1 e Quadro LI).

Em face disto, sugere-se que, em estudos futuros a realizar sobre esta matéria, se utilizem um conjunto variado de taxas de recarga, representativas dos cenários de alterações climáticas, como por exemplo as apresentadas do Capítulo 5. Sugere-se igualmente que as litologias a simular, sejam basaltos com tubos de lava, basaltos muito fracturados e brechóides pouco alterados, basaltos compactos, basaltos e traquitos muito alterados, ignimbritos, piroclastos muito e pouco alterados, por serem as mais representativas, utilizando-se para tanto os valores de permeabilidade conhecidos actualmente para as formações da ilha Terceira (cf. Quadro XXXVI) como quaisquer outros que venham a ser medidos nestas litologias. Relativamente aos cenários do nível do mar, os apresentados no Anexo 1 e nos Quadros L e LI devem ser o ponto de partida mas deverá fazer-se especial atenção a todos os desenvolvimentos que estão neste momento a ocorrer nesta área do conhecimento para os Açores que, por ser uma área tectonicamente activa, terá uma evolução do nível do mar não exclusivamente comandada pela subida do mar devida às alterações climáticas (devida à expansão térmica dos oceanos e ao degelo das calotes glaciares) mas a que se sobrepõe a evolução geotectónica da região.

7.1.2. DEFINIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS ZONAS AFECTADAS PELA ALTERAÇÃO DO NÍVEL DO MAR

O reconhecimento dos pontos de água que podem ser afectados pelas alterações do nível do mar e intrusão salina resulta de uma das consequências das alterações climáticas: a subida global do nível do mar.

Face aos cenários de subida do nível do mar que parecem esboçar-se para os Açores, e tomando em consideração o mais catastrófico (Cenário 1 de subida do nível do mar – subida de 1,5 m em 100 anos, cf. Anexo 1 e Quadro L) verifica-se que, quanto aos aquíferos suspensos que estando actualmente isolados do mar pudessem ficar em contacto com a água salgada devido à subida dos níveis do oceano e ser parcialmente submersos, este risco é virtualmente nulo. Estes aquíferos, nas zonas costeiras onde

aflorem, são assinalados por nascentes cujas cotas são bem mais elevadas do que este cenário de subida de 1,5 m (embora haja cenários que indiquem uma subida superior, comunicação pessoal do Prof. Dias, 2007).

Considerando os efeitos da *submersão dos pontos de água* por simples subida do nível do mar e/ou por recuo da linha de costa, no inventário realizado por NOVO *et al.* (2001), é encontrado um grande número de pontos de água litorais a cotas iguais ou inferiores a 20 m, embora se admita que um número superior possa existir⁸⁴. Considerando os cenários propostos de subida do nível do mar para o ano 2100, e adoptando apenas o mais catastrófico – Cenário 1 = 1,5 m de subida no espaço de 100 anos – assim como os cenários mais prováveis de recuo do litoral (vide Quadros XV a XXVI do Anexo 1 e Quadro LI no presente Capítulo) verifica-se que os pontos de água – nascentes e poços – mais ameaçados de submersão e/ou contaminação, sitos na bordadura litoral (cotas entre 0 e 10 m) e pertencentes aos diversos aquíferos de base, na ilha Terceira, são os que se indicam no Quadro LIII. Se, de acordo com os registos dos marégrafos, a ilha Terceira for a mais afectada por uma alteração do nível do mar, então os seus poços de maré e nascentes litorais são dos mais ameaçados de todo o arquipélago, quer pela submersão devida à subida directa do nível do mar e quer pela eventual submersão devida ao recuo da linha de costa (especialmente no caso das captações por poços).

Quadro LIII – Pontos de Água na Actual Linha de Costa Ameaçados pelos Cenários de Subida do Nível do Mar

Tipo Ponto Água	M (m)	P (m)	Cota (m)	Local	Concelho	Designação Ponto Água
Nascente	477,05	4294,75	0	N Forte do Porto	Praia Vitória	Forte do Porto
Nascente	477,35	4294,9	0	Porto Biscoitos	Praia Vitória	Porto Biscoitos 1
Nascente	477,43	4294,9	0	Baía do Porto dos Biscoitos	Praia Vitória	Porto Biscoitos 2
Poço	477,38	4294,78	0	Baía do Porto dos Biscoitos	Praia Vitória	Porto Biscoitos 3
Nascente	478,03	4294,85	0	W Foz da Canada Brás da Silva	Praia Vitória	Canada Brás da Silva 1
Nascente	478,13	4294,78	0	W Foz da Canada Brás da Silva	Praia Vitória	Canada Brás da Silva 2
Poço	478,4	4294,65	10	Fonte da Joana	Praia Vitória	Poço D. Joana
Nascente	478,45	4294,85	0	Ponta Biscoitos	Praia Vitória	Ponta Biscoitos
Nascente	478,5	4294,68	0	Rolo Rua Longa	Praia Vitória	Rolo Rua Longa
Nascente	480,55	4293,88	0	50 m E Foz Rib. do Urzal	Praia Vitória	Ribeira do Urzal
Nascente	480,48	4293,9	0	Falésia de Rolo das Canas	Praia Vitória	Rolo das Canas
Nascente	468,93	4292,75	0	Arriba W Foz Rib. do Veiga	Angra Heroísmo	Ribeira do Veiga
Nascente	467,55	4290,0	0	Arriba litoral S foz Rib. Além	Angra Heroísmo	Ribeira do Além 1
Nascente	467,63	4290,03	0	Arriba litoral Foz Rib. Além	Angra Heroísmo	Ribeira do Além 2

⁸⁴ Em particular nas ilhas de S. Jorge e Corvo. Por exemplo nesta última ilha existem referências bibliográficas (Zbyszweski *et al.*, 1967) indicando a ocorrência de nascentes no litoral oeste mas sem indicação da sua localização exacta.

Resposta dos Sistemas Aquíferos à Alteração do Nível do Mar

Tipo Ponto Água	M (m)	P (m)	Cota (m)	Local	Concelho	Designação Ponto Água
Nascente	468,08	4291,93	0	Arriba litoral do Cabo da Fajã	Angra Heroísmo	Cabo da Fajã 1
Nascente	468,23	4292,1	0	Arriba litoral N do Cabo da Fajã	Angra Heroísmo	Cabo da Fajã 2
Nascente	482,48	4294,3	0	Falésia Selvagem	Praia Vitória	Ponta Selvagem 1
Nascente	482,38	4294,23	0	Falésia Baía Sta. Cruz	Praia Vitória	Santa Cruz
Nascente	482,55	4294,6	0	Falésia Selvagem (Baleeira)	Praia Vitória	Baleeira
Nascente	485,25	4293,7	0	Arriba 500 m E Foz Rib. Aqualva	Praia Vitória	Ribeira Aqualva
Nascente	486,78	4293,18	10	Arriba 50 m W Foz Rib. Pedras	Praia Vitória	Fonte Rocha
Nascente	494,85	4287,38	5	Praia Vitória	Praia Vitória	Paul 2
Nascente	494,8	4287,48	5	Praia Vitória	Praia Vitória	Paul 3
Nascente	482,2	4294,28	0	Baía Selvagem	Praia Vitória	Ponta Selvagem 2
Nascente	482,8	4294,25	0	Ponta Selvagem	Praia Vitória	Ponta Selvagem 3
Nascente	485,5	4293,73	0	Falésia 1 km E foz Rib. Aqualva	Praia Vitória	Foz Rib. Aqualva
Nascente	481,58	4278,28	0	Castelinho	Angra Heroísmo	Castelinho
Nascente	479,88	4278,68	0	Monte Brasil	Angra Heroísmo	Monte Brasil
Nascente	479,38	4278,78	0	Cais da Silveira	Angra Heroísmo	Cais da Silveira
Nascente	477,55	4278,65	0	Canada Pombal	Angra Heroísmo	Canada Pombal
Nascente	475,4	4278,75	0	Canada da Cruz Dourada	Angra Heroísmo	Cruz Dourada
Nascente	489,75	4277,85	0	Porto Judeu/Cruz	Praia Vitória	Cruz
Nascente	491,45	4277,88	0	Baía da Salga	Praia Vitória	Baía da Salga

Há ainda a considerar a questão das nascentes submarinas, mal conhecidas sobretudo em termos de regimes de caudais e que, perante um recuo da linha costeira e do avanço da intrusão salina, deverão sofrer significativas alterações no seu funcionamento (com possíveis impactos até nos ecossistemas submarinos).

Num estudo detalhado dos impactos do nível do mar sobre os aquíferos costeiros, que remeterá para trabalhos posteriores, deverá ser realizado um detalhado reconhecimento de campo do regime e funcionamento destas nascentes, antes de passar à simulação dos efeitos da subida do nível do mar, intrusão salina e recuo do litoral sobre os regimes e caudais destas mesmas nascentes.

Considerando agora o outro impacto da subida do nível do mar – *a intrusão salina* – e tomando em consideração o mais catastrófico cenário de subida do nível do mar (Cenário 1 – subida de 1,5 m em 100 anos, cf. Anexo 1 e Quadro L, embora, como já se referiu, haja cenários que indiquem uma subida superior, comunicação pessoal do Prof. Dias, 2007), e considerando a questão da intrusão salina, verifica-se que, quanto aos aquíferos suspensos que estando actualmente isolados do mar pudessem ficar em contacto com a água salgada devido à subida dos níveis do oceano (e portanto em possível risco de intrusão salina), de acordo com a distribuição altimétrica das suas próprias nascentes, este risco é virtualmente nulo.

De facto a submersão não é o único risco que correm os pontos de água situados na bordadura litoral das ilhas (ou já agora de uma qualquer região costeira continental)

num cenário de subida do nível do mar; a intrusão salina é outro dos riscos associados à subida do nível do mar, talvez o mais significativo de todos. A extensão para o interior das zonas litorais que podem ser afectadas depende não apenas das condições de equilíbrio entre a pressão hidrostática da cunha de água salina e da cunha de água doce sobrejacente mas também da permeabilidade das litologias dos aquíferos de base que estejam em contacto com o mar, a extensão para o interior das zonas mais permeáveis e das condutas de circulação preferencial (ex.: fracturas, tubos de lava, etc.), ou seja da heterogeneidade dos aquíferos, característica sempre de muito difícil definição, em especial nas formações de origem vulcânica. Ignorando as situações de sobreexploração, que deslocam o equilíbrio no sentido da intrusão da água do mar, e que potenciarão ainda mais este problema em caso de subida do nível do mar, mas tomando apenas as indicações das transmissividades actualmente conhecidas (DROTRH e IA, 2001) para as litologias de aquíferos de base, pode obter-se um quadro das regiões mais susceptíveis a este problema (Quadro LIV):

Quadro LIV – Sectores dos Aquíferos de Base Mais Susceptíveis aos Fenómenos de Intrusão Salina (DROTRH e IA, 2001)

Sector Aquífero	T (m ² /d) *	K (m/d) *	Susceptibilidade
Biscoitos-Terra Chã	878	121	Muito susceptível
Graben	7379-7906	731-732	Muito susceptível
Guilherme Moniz-S. Sebastião	752-11425	5713	Muitíssimo a muito susceptível

Da avaliação qualitativa baseada tanto no conhecimento existente das características das formações do aquífero de base, assim como nos escassos dados de permeabilidades, com vista à avaliação, de base qualitativa, da resposta à intrusão salina, é possível referenciar as regiões que serão potencialmente mais susceptíveis a este problema (vide Quadro LIV, acima, e Anexo 1).

Como estudos futuros sugere-se a modelação matemática da intrusão salina para vários cenários de subida do mar e alterações climáticas, que realizem a análise da evolução da migração da interface água doce/água salgada em cada um destes cenários e permitam a definição, delimitação e caracterização das zonas afectadas. Este poderá ser o primeiro passo com vista a uma definição quantitativa de pormenor das susceptibilidades das litologias açoreanas à intrusão salina em condições de alteração climática.

8. IMPACTO DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS NOS RECURSOS DISPONÍVEIS E NOS CONSUMOS HUMANOS

Neste capítulo pretende-se avaliar os impactos que as alterações climáticas terão nos consumos humanos e o conseqüente stress hídrico que tais consumos modificados irão impor aos aquíferos, tanto em termos de quantidade como de qualidade. Para tal começa por se caracterizar os tipos de pontos de água existentes (incluindo as suas propriedades hidráulicas e caudais médios sazonais) e, nas regiões mais conhecidas, onde tal tipo de dados está disponível, os volumes anuais drenados pelas nascentes e o que destes caudais corresponde à recarga directa, assim como a percentagem que se deve à drenância. Definem-se igualmente os consumos actuais, seguindo-se o estabelecimento de cenários de consumos (considerando também as possíveis alterações que se possam registar quanto aos tipos de actividades humanas e consumos associados) para cada cenário de alteração climática nos Açores. A partir dos diferentes cenários de alteração climática e respectivas modificações nos valores de recarga directa, determinam-se as possíveis alterações desta recarga que é escoada pelas nascentes e as alterações dos volumes totais de descarga das mesmas tanto em valores médios anuais como sazonais. Para cada cenário de alteração climática é também calculado o stress hídrico imposto aos aquíferos.

8.1. Inventário dos Pontos de Água dos Açores

Para uma compreensão de como os volumes de recursos hídricos disponíveis poderão variar com as alterações climáticas é necessário conhecer a situação actual, designada como “de referência”. Assim é necessário conhecer o número, tipo e volumes de água fornecidos por cada ponto de água. Perante os cenários de alterações climáticas que se admitem para os Açores, e após modelação matemática adequada para determinar as várias componentes – escoamento superficial, recarga, etc. – do ciclo hidrológico, deve tentar-se, com base nos resultados destas modelações, avaliar o tipo de modificações nos caudais que podem afectar cada ponto de água. Tal modelação, para as recargas e escoamentos superficiais, foi realizada no Capítulo 5; no presente capítulo faz-se a modelação da modificação dos caudais das nascentes (área do Cabrito, cf. Quadros LXV, LXVI e LXVII), com vista à compreensão da quantidade de água disponível para os consumos, nos vários cenários de alteração climática.

O inventário dos pontos de água actuais tem por fontes Azevedo *et al.* (1986), Menezes (1996), Rodrigues (1993), Rodrigues *et al.* (1996). No Quadro LV apresenta-se um breve resumo das características de pontos de água da ilha Terceira, conforme a base de dados INVENTAR_AÇORES desenvolvida por Novo *et al.* (2001). Os caudais em questão correspondem a caudais medidos num único instante, no período de estiagem.

Quadro LV – Características (Caudais) de Pontos de Água da Ilha Terceira

Nome do Ponto de Água	Caudal de Estiagem (l/s)	Nome do Ponto de Água	Caudal de Estiagem (l/s)
Canada Brás da Silva	3,01	Rocha da Canada do Cabo	0,023
Poço da D. Joana	0	Fonte da Rocha	0,035
Santa Cruz	0,041	Fonte da Caldeira	0,072
Pias 1	0,289	Fonte do Manuel Borges	0,058
Pias 3	0	Fonte da Canada de Cima da Ladeira	0,023
Caldeirão	6,23	Fonte da Ribeira da Pena	0,463
Valado	1,94	Ribeira da Pena de Cima ou da Pena I	0,15
Fonte do Gato 1	1,875	Ribeira da Pena II	0,313
Fonte do Gato 2	0,347	Ladeira da Pena	0,012
Fonte do Gato 3	0,83	Treme-Treme I	0,162
Fonte da Rocha	1,27	Treme-Treme II	0,012
Rolo da Cruz	0,289	Ladeira da Pedra I ou Ladeira da Pena I	1,065
Rolo das Canas	0,174	Ladeira da Pedra II ou Ladeira da Pena II	0,347
Fonte dos Moinhos 1	5,79	Nascente do Chafariz de Ladeira da Pedra ou Ladeira da Pedra V	0,023
Fonte dos Moinhos 2 ou Aberta	4,17	L Ladeira da Pedra III	0,174
Fonte da Bica	0,035	Ladeira da Pedra IV	0,116
Fonte do Almeida	1,875	Ladeira da Pedra VI	0,139
Fajãs de Cima - Fonte do Ramalho de Cima	0,013	Patas	0,498
Fajãs de Baixo - Fonte do Ramalho de Baixo	0,015	José Borges	0,116
Nascente da Serra	0,046	Feraz ou do Ferrazinho	0,197 – 0,833
Viveiros	0,046	Canada do Coxo	0,347
Baleeira	0,463	Pico Celeiro	0,347
Fonte da Alagoa	7,52	Fonte João Dias Menezes ou Serra do Cume	0,012
Fonte do Alquebre	0,15	Canada do Salomão	0,104
Fontinha	0,08	Fonte do Dionísio	0,012
Fonte do Passo Alto	0,116	Fonte do Minhoco I	0,602
Fonte do Caminho Novo	0,22	Fonte do Minhoco II	0,301
Fonte da Carlota	0,336	Beiras	0,231
Fonte do Caminho Novo de Cima	0,081	Beiras II, Beiras ou Canada	0,058
Fonte do Moinho ou Fonte das Azenhas	0,347	Fonte do Sabugueiro	0,984
Frechas II	2,894	Fonte do Picão	0,347
Frechas I	1,736	Fonte do Loiral I / Domingos Ventura	0,035
Frechas	5,787	Fonte do Loiral II	0,22
N1	5,995	Loiral III	0,37
Silveira	1,25	Fonte dos Patreiras	0,926
Frechas III	0,579	Bicas da Saúde I ou José Toledo	0,185
Sabão	0,5787	Bicas da Saúde II ou José Toledo	0,162
N2	5,787	Bicas da Saúde III ou José Toledo	0,995
Nascente Superior da Ribeira de Aqualva	6,366	Bicas da Saúde IV ou José Toledo	0,174
Madalena I ou Madalena de Cima	0,752	Água Velha I	0,116
Madalena II ou Madalena de Baixo	0,81	Água Velha II	0,174
Laguinhos	1,875	Fonte do Girão	0,035
Fonte Nova	3,47	Covões I ou Marca Funda I	0,231
Nascente do Golf; sobras da Nascente do Rato	0,961	Covões II, Covões ou Marca Funda II	0,174
Fonte do Rato ou Água do Rato	0,208	Fonte do Zimbral	0,023
Fonte das Laranjeiras de Cima ou Laranjeiras 2	0,058	Bura	6,065

Nome do Ponto de Água	Caudal de Estiagem (l/s)	Nome do Ponto de Água	Caudal de Estiagem (l/s)
Fonte das Laranjeiras de Baixo ou Laranjeiras I	0,058	Galinheiro	3,472
Fonte da Bica	0,058	José Gueixo de Baixo/José Gueixo 2	2,315
Canada do Cabo ou Canada do Passo	0,012	José Gueixo de Cima/José Gueixo 1	5,995
Furo T-1301	18,4–19,8	Furo T-1112	5
Furo T-1302	15,7–22,7	Furo T-1011	4,7
Furo T-1303	12,9–18	Furo Juncal I	15
Furo T-1305	12,6–19	Furo Canada Saúde	19,2
Furo T-1306	19	Furo Pico Celeiro	19,2
Furo T-928	10–11	Furo CP Paúl II	2,5
Furo NW	7,6		

8.2. Cenários de Consumos Humanos e Alterações Climáticas

A actividade antrópica e o stress que é passível de ser imposto aos recursos hídricos é um factor controlado não apenas pelo desenvolvimento das comunidades humanas mas também pelas modificações do clima a que essas comunidades estão sujeitas, daí a importância de analisar este aspecto quando se pretende compreender a vulnerabilidade dos recursos hídricos a estas alterações do clima. Para se compreender como a actividade humana responde às mudanças climáticas e como essa resposta se reflecte nos recursos hídricos é necessário:

- 1º - Conhecer a situação nas condições climáticas e sócio-económicas actuais de consumos e cargas poluentes que é imposta aos sistemas hídricos superficiais e/ou subterrâneos (que serão designadas por “*de referência*”).
- 2º - Estabelecer cenários possíveis de alteração dos consumos/cargas poluentes para distintos cenários de alterações climáticas.
- 3º - Construir cenários de como estas alterações de consumos/cargas poluentes afectam os recursos hídricos.

Num cenário de alterações climáticas as actividades humanas terão de se modificar, adoptando um conjunto de estratégias que se denominam adaptação. Entre estas tem-se a considerar as actividades económicas e uma das mais importantes e onde se espera maiores mudanças é a actividade agrícola, nomeadamente ao nível das práticas agrícolas e da mudança de culturas para espécies melhor adaptadas às novas condições climáticas. As modificações na actividade agrícola têm impactos ao nível dos recursos hídricos, ao modificar o tipo de coberto vegetal (para culturas melhor adaptadas às novas condições) e assim modificar (1) os volumes de evapotranspiração extraídos ao meio hídrico subterrâneo, (2) controle do escoamento. Outro impacto extremamente importante, num cenário de subida global da temperatura, é o aumento das necessidades hídricas das culturas e portanto o aumento dos volumes extraídos dos aquíferos destinados à rega. Outro sector de consumos que, num cenário de aumento das temperaturas, adoptará estratégias de adaptação é o dos consumos domésticos, dada a necessidade das pessoas consumirem mais água para a manutenção do seu bem-estar físico. Além das alterações climáticas, a subida dos consumos domésticos aumenta também por factores sociológicos – caso do actual e registado aumento dos consumos

que já se verifica na região – devido a um mais fácil acesso à água e à criação de necessidades novas ou mais exigentes de consumo da água. Se o aspecto sociológico de alteração dos hábitos de consumo de água não será analisado neste trabalho por se considerar fora do âmbito do mesmo, dado estarem fora do âmbito da actividade do hidrogeólogo, o aspecto das alterações dos consumos devidos a respostas adaptativas às alterações climáticas tentará ser abordado neste capítulo. Deve referir-se, porém, que uma correcta avaliação dos impactos dos consumos humanos sobre os recursos hídricos subterrâneos deveria englobar os aspectos sociológicos já referidos, dado que estes são, entre outros aspectos, os principais motivadores da adopção de estratégias de adaptação e modificação dos hábitos e volumes de consumos de água.

A análise da situação de referência dos consumos e das actividades económicas com maiores impactos sobre os recursos hídricos subterrâneos mostra que para as condições climáticas e sócio-económicas actuais nos Açores, a mais importante quanto a volumes de água extraídos é a dos consumos **urbanos**, de acordo com os dados de DROTRH e IA (2001), seguindo-se a **agro-pecuária** e a **industrial**, sendo que a restante **actividade agrícola** tem um peso diminuto nos consumos quando comparada com o sector agro-pecuário⁸⁵ (cf. DROTRH e IA, 2001). Os consumos designados por urbanos englobam o sector dos serviços (com a exclusão do Turismo) em conjunto com outras actividades não económicas como o consumo doméstico. Este sector de consumos equivale a cerca do triplo dos consumos industriais ou da actividade agro-pecuária. Nos valores registados, que se apresentam no Quadro LVI (fonte DROTRH e IA, 2001), a actividade industrial e agro-pecuária equivalem-se em termos de consumos. No entanto será de admitir que a agro-pecuária tenha um maior volume de consumos, dado uma parte do seu abastecimento se realizar por pontos de água privados e como tal excluídos da contabilização oficial (de acordo com o Plano Regional da Água dos Açores o total de abastecimento privado equivale, no caso da pecuária, a cerca de 30% das necessidades); de referir que cerca de 90% dos gastos agrícolas são agro-pecuários. Os volumes de consumos são apresentados abaixo no Quadro LVI, para a ilha Terceira.

Quadro LVI - Consumos Anuais de Água por Actividade Económica (em m³) para a Ilha Terceira (DROTRH e IA, 2001)

Urbano	Indústria	Agro-pecuária	Turismo	Energia	Outros	Total
3 541 953	1 443 780	1 447 538	74 112	9 984	85 744	6 603 111

Assim as actividades que mais contribuem para o **stress hídrico**⁸⁶, são as Domésticas, Indústria e Agro-Pecuária, desempenhando todas as outras um papel secundário.

Apenas como carácter informal enunciam-se aqui os impactos dos vários sectores de actividade económica sobre a qualidade das águas. Tomando como fonte de informação mais uma vez o Plano Regional da Água (DROTRH e IA, 2001), as cargas

⁸⁵ Note-se que, segundo DROTRH e IA (2001) para a globalidade da área dos Açores, 94% da área é ocupada por prados, pastagens ou culturas forrageiras.

⁸⁶ Do ponto de vista exclusivamente quantitativo.

poluentes mais representativas para a ilha Terceira são apresentadas nos Quadros LVII e LVIII.

Quadro LVII – Cargas Poluentes para Actividades Doméstica e Pecuária (DROTRH e IA, 2001)

CBO ₅ (ton./ano)		P (ton./ano)		N (ton./ano)	
Doméstico	Pecuária	Doméstico	Pecuária *	Doméstico	Pecuária
744	17 788	63	1 790	219	5 186

*o Fósforo nos efluentes pecuários é considerado segundo o composto P₂O₅.

Quadro LVIII – Carga Poluente em CBO₅ (ton./ano) para Várias Actividades Económicas (DROTRH e IA, 2001)

Urbano	Indústria	Agro-pecuária
744	< 100 – 1 500	17 788

Daqui se verifica que a agricultura é a actividade com maior impacto ao nível da qualidade das águas, no que se refere não apenas em termos de N, P e Carência Bioquímica de Oxigénio a 5 dias (CBO₅) mas também em termos de substâncias perigosas (pesticidas, herbicidas, etc.). A criação de bovinos é a responsável pela maior percentagem da produção de efluentes, sendo que para um total de 71 036 t/ano de CBO₅, 61 606 t/ano de CBO₅ são gerados pela criação de bovinos, ou seja cerca de 86,7% do total. As actividades domésticas têm ainda alguma importância em termos de impacto na qualidade, sobretudo no que se refere à carência de oxigénio, assim como à contaminação microbiana⁸⁷. A indústria admite-se que desempenhe papel relativamente menor embora possa, a nível pontual, causar impactos significativos na qualidade das águas.

Naturalmente, as alterações nos padrões de consumo, irão implicar também alterações ao nível da carga poluente, por exemplo pela mudança para novos tipos de práticas agrícolas e/ou agro-pecuárias, acarretando uma alteração nos valores das cargas poluentes ou até eventualmente o aparecimento de diferentes espectros de poluição. Por outro lado as alterações do clima podem alterar a susceptibilidade dos meios hídricos à poluição (cf. Civita e De Maio, 1998), alterando a sua capacidade para acomodar novos tipos e/ou volumes de cargas poluentes desencadeadas pelas modificações nos consumos como resposta de adaptação às alterações climáticas.

A adaptação das actividades económicas às alterações climáticas consiste basicamente, como se viu atrás, na modificação do tipo de actividades e nos volumes de consumos. Um dos grandes sectores afectados é a agricultura, incluindo a actividade agro-pecuária pois as alterações climáticas têm impactos não apenas sobre as espécies cultivadas e pastagens mas também sobre a própria saúde dos animais. Para a actividade agrícola se adaptar às alterações climáticas pode ser necessário alterar os tipos de culturas, as formas de rega e o tipo de actividade agro-pecuária (por exemplo mudando o sistema de apascentamento ou o tipo de gado criado, mais adaptado às novas

⁸⁷ Se não existir tratamento de efluentes ou este tratamento for deficiente.

condições) e tal terá efeitos nos volumes de consumo de água. Por exemplo, manter práticas agrícolas que exigem significativa disponibilidade de água (ex.: regadio ou pastos permanentes) em condições de aumento da temperatura originará um incremento dos consumos, embora a estratégia de mudança das culturas para actividades mais de sequeiro possa ter um efeito inverso. No caso do continente português, e dado que para a generalidade do território os cenários prevêm uma redução dos volumes de precipitação e – deste modo – uma redução dos volumes de recarga, um aumento dos consumos causará um maior stress hídrico sobre os aquíferos. No caso dos Açores, a situação é algo distinta, visto que um dos cenários (A2) prevê uma redução da média anual da precipitação na ilha Terceira, ao passo que o cenário B2 prevê uma subida destes mesmos valores médios anuais. Assim, se se verificar o cenário A2, e se se admitir o aumento dos consumos (dado entre outras razões o aumento da temperatura previsto pelos mesmos cenários), haverá em termos globais um aumento do stress hídrico sobre os recursos subterrâneos, ao passo que no cenário B2 esse stress será, em princípio, mais atenuado. Porém, em ambos os cenários se verificará um aumento do stress hídrico na época de estio (dado ambos preverem reduções da precipitação nesse período), que será mais acentuado no caso do cenário A2; no Inverno, e como ambos prevêm incrementos da precipitação invernal, o stress hídrico deverá ser diminuído⁸⁸. Deste modo uma das estratégias de adaptação às novas condições que evite o aumento do stress hídrico será, por exemplo, a construção de reservatórios de recolha das águas excedentárias de Inverno para serem usadas no Verão. Em qualquer caso a situação da evolução dos consumos no sector agrícola/agro-pecuário estará fortemente dependente da evolução no sector agro-pecuário, o qual responde a factores não apenas de ordem sócio-económica (ex.: subsídios à criação de dadas espécies de gado) como também fito-sanitária (ex.: condições de maior temperatura podem gerar o surgimento de doenças da faixa tropical para a qual as raças de gado setentrional não estejam adaptadas e portanto levar à escolha de novas raças para criação, que podem ter outras necessidades em água).

Outro sector afectado pelas alterações climáticas é o turismo. As alterações do clima numa região podem levá-la a deixar de ser destino turístico ou pelo contrário elegê-la como destino preferencial. No caso do turismo relacionado com actividades marítimas (mergulho, pesca submarina, observação de mamíferos marinhos, etc.) as modificações das condições no oceano causadas pelas alterações climáticas, incluindo modificações na fauna e flora marinha, podem ter significativo impacto sobre o turismo (ex.: morte de corais por aumento da temperatura superficial dos oceanos pode levar ao abandono de estâncias turísticas vocacionadas para o mergulho). Pouco se conhece ainda sobre como as alterações climáticas poderão afectar o potencial turístico da vida marinha nos Açores, mas todas estas alterações têm reflexos no afluxo turístico e portanto nos consumos, com os consequentes impactos sobre os recursos hídricos. Nos Açores o turismo tem sido um sector em crescimento, não se centrando apenas num sector de actividade mas abrangendo várias áreas, desde o turismo ligado às actividades de mar ao turismo mais tradicional. Dado o tipo de alterações climáticas previstas pelos cenários A2 e B2 considerados no estudo SIAM (2005) para os Açores, e as enormes

⁸⁸ Ao mesmo tempo estas condições podem indiciar um aumento do escoamento superficial durante o Inverno.

incertezas que existem ao nível da previsão da evolução deste sector de actividade é difícil prever de que modo as alterações climáticas afectarão esta região. Seja como for, as alterações climáticas originam diferentes nichos no mercado turístico e, como já foi referido, geram alterações nos consumos de água associados a esta actividade. Dado ser esta actividade fortemente dependente de cenários sócio-económicos, ainda mal conhecidos para os Açores, não se farão análises de pormenor sobre a sua evolução dos consumos.

O sector da energia sofre também alterações nos consumos em água, devido aos novos consumos de energia provocados pelas alterações climáticas (ex.: aumento das necessidades de refrigeração por um aumento global da temperatura atmosférica, etc.). De igual modo a indústria será afectada nos seus consumos de água pelas alterações climáticas, sendo que nos cenários de aumento das temperaturas atmosféricas, sentirá necessidade dum aumento de refrigeração das maquinarias ou da conservação dos produtos base para manufactura.

Uma evolução similar afectará o consumo urbano (e doméstico) dado que, em condições de aumento de temperatura, como já se viu anteriormente, as necessidades fisiológicas básicas de água dos indivíduos, aumenta. Ao mesmo tempo estes consumos estão também muito dependentes de cenários de evolução sócio-económica. Assim, e ignorando os cenários sócio-económicos que como já se disse, estão pouco definidos para os Açores, em especial os que considerem em simultâneo as alterações climáticas e a evolução sócio-económica⁸⁹, tomando em conta apenas os cenários de alteração climática definidos por SIAM (2005) para esta região, é de admitir que os consumos urbanos/domésticos venham a sofrer um incremento. O valor deste incremento é, devido à ausência de dados da componente sociológica, contudo desconhecido.

Depois da definição dos volumes de consumos actuais, é necessário definir a relação entre necessidades e disponibilidades dos recursos hídricos. A relação entre necessidades e disponibilidades actual é, segundo o Plano Regional da Água (DROTRH e IA, 2001), apresentada no Quadro LIX, para a ilha Terceira.

Quadro LIX - Relação entre Necessidades e Disponibilidades de Água nas Condições Actuais (DROTRH e IA, 2001)

Relação das Necessidades vs. Disponibilidades (%)
38

De seguida devem estabelecer-se os cenários de consumos para os novos cenários de alterações climáticas. A partir destes cenários e dos resultados dos volumes de recarga estabelecidos para os mesmos cenários climáticos (cf. Capítulo 5) poderá determinar-se o stress hídrico para essas novas condições. Mais uma vez se sublinha que, na ausência de cenários de evolução sócio-económica para os Açores sob estes cenários de alteração climática, os cenários de consumos que se estabelecem abaixo devem ser encarados como estritamente teóricos, representando uma primeira abordagem, muito incompleta, ao tema.

⁸⁹ Ao invés de Portugal Continental onde estes cenários foram já definidos (cf. SIAM, 2002).

Para o Continente, as simulações indicam que a potencialidade agrícola – segundo a classificação de Papadakis (1975) – das várias regiões tende a deslocar-se para classes de culturas agrícolas apropriadas a climas mais quentes e que para o caso das culturas “milho”, que exemplificam as culturas de regadio, no cenário mais desfavorável para o meio hídrico, se regista um aumento do consumo de 37%.

Nos Açores e para as condições actuais, o Plano Regional da Água (DROTRH e IA, 2001), estabeleceu dois cenários de evolução sócio-económica para os consumos domésticos, os quais não entram em consideração com os problemas de alteração climática. No cenário A, conservador, considera-se que existirá uma tendência para a estabilização da população, embora os consumos *per capita* aumentem; no cenário B, de “ruptura”, admite-se que haverá aumento considerável da população, assim como do consumo *per capita*. Nestes cenários, foi estabelecido que as capitações urbanas de água em 2020 serão de 220 l/habitante por dia, contra 170 l/habitante por dia em 1999; isto equivale a um aumento de consumos urbanos de cerca 30% (por habitante). Aplicando os dois cenários sócio-económicos a este incremento dos consumos por habitante, para o mesmo horizonte temporal de 2020, o Plano Regional da Água definiu os seguintes consumos na ilha Terceira (Quadro LX):

Quadro LX – Consumos Urbanos Previstos para 2020 na Ilha Terceira (DROTRH e IA, 2001)

Concelho	Consumos (10^3 m ³ /ano)	
	Cenário A – ano 2020	Cenário B – ano 2020
Angra do Heroísmo	2 830	2 932
Praia da Vitória	1 933	2 003
<i>Total</i>	<i>4 764</i>	<i>4 935</i>

Se se admitir que o incremento de consumos será semelhante até ao ano 2100, então ter-se-ia nesta data consumos urbanos da ordem de (Quadro LXI):

Quadro LXI – Consumos Urbanos Previstos para 2100 na Ilha Terceira (não considerando as alterações climáticas)

Concelho	Consumos (10^3 m ³ /ano)	
	Cenário A – ano 2100	Cenário B – ano 2100
Angra do Heroísmo	5 403	5 598
Praia da Vitória	3 690	3 881
<i>Total</i>	<i>9 093</i>	<i>9 479</i>

Para a indústria, e por um raciocínio semelhante, verifica-se que os consumos em 1999 eram de 894 000 m³/ano para o concelho de Angra do Heroísmo e de 217 000 m³/ano para o concelho da Praia da Vitória, enquanto que no ano de 2020 (valores de DROTRH e IA, 2001) e 2100 os consumos estão assinalados no Quadro LVIII. Como se pode ver os cenários para o ano 2020 assinalam um aumento dos consumos, para o cenário A da ordem de 0,33% no concelho de Angra do Heroísmo e de 12,4% no de Praia da Vitória; para o cenário B regista-se um decréscimo de 40% para Angra do

Heroísmo e uma subida de 17,5% em Praia da Vitória. Estas variações foram consideradas idênticas para o cálculo dos consumos em 2100 (Quadro LXII).

Quadro LXII – Consumos Industriais Previstos para 2100 na Ilha Terceira (não considerando as alterações climáticas)

Concelho	Consumos (10 ³ m ³ /ano)			
	Cenário A		Cenário B – ano 2100	
	Ano 2020	Ano 2100	Ano 2020	Ano 2100
Angra do Heroísmo	897	909	540	315
Praia da Vitória	244	366	255	434
<i>Total</i>	<i>1 114</i>	<i>1 275</i>	<i>638</i>	<i>749</i>

Para os consumos agro-pecuários os cenários sócio-económicos, que não consideram, ressalve-se mais uma vez a questão da alterações climáticas, indicam que:

- ◆ **Cenário A** – crescimento nulo nos consumos associados à criação de bovinos; crescimento de 0 a 12,5% nos consumos de água associados à criação de suínos e um crescimento de 0 a 33% nos consumos associados à criação de aves;
- ◆ **Cenário B** – decréscimo de 40 a 49% nos consumos de água associados à criação de bovinos; crescimento de 4 a 17% nos consumos associados à criação de suínos e de 4 a 33% no consumo associado à criação de aves.

Os consumos para 2020 e 2110 (admitindo que o crescimento de consumos se mantém constante ao previsto para 2020) apresentam-se no Quadro LXIII:

Quadro LXIII – Consumos Agro-Pecuários Previstos para 2100 na Ilha Terceira (não considerando as alterações climáticas)

Concelho	Consumos (10 ³ m ³ /ano)											
	Cenário A						Cenário B – ano 2100					
	Ano 2020			Ano 2100			Ano 2020			Ano 2100		
	Bov	Suin	Ave	Bov	Suin	Ave	Bov	Suin	Ave	Bov	Suin	Ave
Angra do Heroísmo	852	26	26	852	26	26	509	27	27	311	31	31
Praia da Vitória	489	27	4	489	41	9	250	28	4	239	47	9
<i>Total</i>	<i>1 340</i>	<i>52</i>	<i>31</i>	<i>1 341</i>	<i>67</i>	<i>35</i>	<i>758</i>	<i>55</i>	<i>31</i>	<i>550</i>	<i>78</i>	<i>40</i>

Considerando agora as alterações climáticas, e o aumento dos consumos que daí poderá advir, no sector da agricultura, SIAM (2002), previu para Portugal alterações no tipo de culturas e, no caso da cultura do milho, um aumento no consumo em água de até + 37% para prover às necessidades desta cultura. Estando o sector agrícola em regressão em Portugal Continental e sendo constituído por numerosas culturas que não são simuladas pelo programa CERES utilizado, é difícil presumir o que um aumento de consumos de culturas do tipo milho pode ter de facto como impacto global na evolução dos consumos do sector agrícola.

Para os Açores, no aspecto agrícola, o sector preponderante é o pecuário, em especial o da criação de bovinos. Como vimos acima, a criação de bovinos, principal consumidora de água no sector agrário, para os cenários sócio-económicos admitidos

pelo Plano Regional da Água dos Açores, os quais não reflectem os problemas das alterações climáticas, tem uma estagnação ou uma leve subida que pode ir até aos 12% (cenário A) ou ter uma significativa redução (cenário B). Por seu lado os consumos industriais podem ter um aumento de até 12% (cenário A) ou um decréscimo que pode ir até aos 40% (cenário B – concelho de Angra do Heroísmo). Os consumos urbanos têm um aumento de até 30% (cenário A) e de apenas 13% no cenário B.

Por seu lado os cenários de emissões de gases de efeito de estufa, adoptados para os Açores por SIAM (2005) são:

- ◆ **Cenário A2** (“*business as usual*”) – onde se mantém a actual taxa de evolução das emissões, sem qualquer medida de controlo, projectando para o ano 2100 uma concentração de CO₂ na atmosfera de cerca de 850 ppm; neste cenário não existem medidas restritivas e, em termos de consumos de água podemos admitir que a evolução será paralela à apresentada acima (Quadros LX a LXIII), devidamente aumentada para acomodar as necessidades das várias actividades económicas em face dos aumentos expectáveis de temperatura. De acordo com os resultados da modelação realizada por SIAM (2005), o aumento da temperatura é da ordem dos 2 °C (1,7 a 2,3 °C nas máximas e 1,8 a 2 °C nas mínimas).
- ◆ **Cenário B2** – onde existe definido um limite de emissões, resultando em que a concentração de CO₂ na atmosfera em 2100 é de cerca de 600 ppm; na ausência de projecções actuais sobre os consumos nestas condições, admitiu-se que um menor incremento nos consumos de água, relativamente aos admitido para o cenário A2. De acordo com os resultados da modelação realizada por SIAM (2005), o aumento da temperatura é da ordem de 1 a 1,2 °C (1,2 a 1,5 °C nas máximas e 1 a 1,2 °C nas mínimas).

O estudo dos cenários sócio-económicos para os Açores, considerando os efeitos das alterações climáticas, não deram ainda projecções das alterações dos consumos. Dado o facto de para este arquipélago se prever um aumento da temperatura, será de admitir que os consumos de água aumentarão de igual modo. Na ausência de dados de projecções de consumos, decidiu-se que, sendo o peso dos consumos centrado no sector urbano, este deverá ser o valor de base para o estabelecimento de cenários de consumos em termos de alterações climáticas; subsidiariamente, e para o sector agrícola, deverá considerar-se apenas a criação de bovinos, dado o reduzido volume de consumos das outras espécies pecuárias. Contudo deve ter-se em consideração que este é apenas um dos cenários evolutivos possíveis, simplificado, baseado na fraca importância actual da indústria em termos de consumos, e nas importâncias relativas dos consumos agro-pecuários e domésticos; na fase de conhecimento actual não se pode prever, com um mínimo de certeza, como as alterações climáticas poderão afectar o tipo de agro-pecuária (ex.: mudança para espécies resistentes a estirpes novas de doenças e/ou mais produtivas em climas mais quentes) ou o tipo de culturas agrícolas a praticar no futuro e portanto não é possível de projectar se a actividade agrícola/agro-pecuária poderá ou não vir a sobrepor-se em termos de consumos de água ao sector doméstico/urbano. Deste modo, preferiu-se usar um cenário conhecido e manter a proporção relativa da importância dos consumos de água entre os vários sectores, afectando-os simplesmente de um acréscimo. Os valores de acréscimo são uma proporção simples relacionada com

o aumento das temperaturas médias, o que pode não reflectir a realidade da evolução dos consumos, mas no estado actual dos conhecimentos é a melhor abordagem aproximada que foi possível estabelecer. Assim ter-se-ia:

- ◆ **Cenário A2** (cenário de emissão de gases de efeito de estufa) – na ausência de dados concretos que permitam avaliar o incremento global dos consumos em face deste cenário de alteração climática, e sendo este o cenário mais catastrófico, optou-se por realizar um exercício teórico e considerar igualmente um cenário catastrófico de incremento dos consumos de água, resultante de medidas de mitigação/adaptação às alterações climáticas. Assim, e apenas para uma análise teórica, admitiu-se uma quadruplicação dos consumos de pessoas e animais e a triplicação das necessidades da indústria. Sobrepondo este acréscimo às tendências projectadas pelos cenários sócio-económicos actuais, ter-se-á acréscimos de consumos da ordem de:
 - ◆ **Urbano** – Cenário A e Cenário B: quadruplica o consumo previsto para 2100 (Quadro LXI);
 - ◆ **Industrial** – Cenário A e Cenário B: triplica o consumo previsto para 2100 (Quadro LXII);
 - ◆ **Agrícola** – Cenário A e Cenário B: quadruplica o consumo previsto para 2100 (Quadro LXIII).

- ◆ **Cenário B2** (cenário de emissão de gases de efeito de estufa) – na ausência de dados capazes de avaliar as alterações nos consumos neste cenário de alteração climática, optou-se pela mesma abordagem realizada para o cenário A2. Contudo, como este cenário é menos catastrófico, decidiu-se admitir aumentos de consumos mais moderados, atribuindo-se uma duplicação dos consumos de pessoas e animais, e de 1,5x para necessidades da indústria. Sobrepondo tais acréscimos às tendências projectadas pelos cenários sócio-económicos actuais, os novos consumos serão de (Quadro LXIV):
 - ◆ **Urbano** – Cenário A e Cenário B: O consumo é 2x superior ao previsto para 2100 (Quadro LXI);
 - ◆ **Industrial** – Cenário A e Cenário B: o consumo é 1,5x superior ao previsto para 2100 (Quadro LXII);
 - ◆ **Agrícola** – Cenário A e Cenário B: o consumo é 2x superior ao previsto para 2100 (Quadro LXIII).

Admitiu-se que, para uma subida média de 1 °C na temperatura média anual, as necessidades de consumos de pessoas e animais duplica e a necessidade em água para refrigeração e manutenção da maquinaria será um pouco inferior; como para os cenários A2 a subida média de $T_{\text{anual}} \approx 2$ °C e para os cenários B2 esta subida é cerca de 1,2 °C (cf. Capítulo 4) as subidas de consumos são da ordem de grandeza apresentada.

**Quadro LXIV – Consumos Previstos para os Cenários de Alterações Climáticas
(consumos dados em 10³ m³/ano)**

Concelhos	Consumos	Cenário Climático A2		Cenário Climático B2	
		Cenário A	Cenário B	Cenário A	Cenário B
Angra do Heroísmo	Urbano	21 612	22 392	10 806	11 196
	Industrial	2 727	945	1 363,5	472,5
	Agro-pecuário	3 616	1 492	1 808	746
	Total	27 955	24 829	13 977,5	12 414,5
Praia da Vitória	Urbano	14 760	15 524	7 380	7 762
	Industrial	1 098	1 302	549	651
	Agro-pecuário	2 156	1 180	1 078	590
	Total	18 014	18 006	9 007	9 003
Toda a Ilha	Urbano	36 372	37 916	18 186	18 958
	Industrial	3 825	2 247	1 912,5	1 123,5
	Agro-pecuário	5 772	2 672	2 886	1 336
	Total	45 969	42 835	22 984,5	21 417,5

8.3. Alteração de Volumes Anuais das Descargas de Nascentes em Função de Cenários de Alterações Climáticas

Neste sub-capítulo pretende-se analisar as alterações que se possam registar ao nível das nascentes para os vários cenários de alterações climáticas. Para esta análise é necessário conhecer-se primeiro as condições actuais, que serão designadas por “de referência”. Nos Açores em geral, e tal situação inclui a ilha Terceira, a caracterização dos caudais de nascentes não é habitualmente detalhada quanto basta para se estabelecer uma relação clara entre os volumes escoados pelas nascente e as recargas dos sistema aquíferos que drenam. Na ilha Terceira a zona do Cabrito é a melhor caracterizada deste ponto de vista, e é para este aquífero, incluso no sistema aquífero Caldeira de Guilherme Moniz-São Sebastião definido por DROTRH e IA (2001) que tal análise será realizada.

Para as condições climáticas da década de 1990, e apenas para o conjunto de nascentes que drenam o aquífero do Cabrito, o caudal de estiagem corresponde a cerca de 58% da recarga de estiagem. A nível médio anual a recarga era de 12,2 hm³ e a descarga total das nascentes era de 7,7 hm³, ou seja, a descarga média anual das nascentes corresponde a cerca de 63% do total da recarga anual (Novo *et al.*, 1997). Neste caso específico cerca de 2,5 hm³ (isto é, cerca de 18%) são admitidos como armazenados no aquífero, enquanto que os cerca de 20% restantes se admite que sejam transmitidos por drenância para os aquíferos subjacentes.

Considerando os cenários de alteração de precipitação/evapotranspiração considerados no Capítulo 5 e consequentes alterações dos valores de recarga, procurar-se-á verificar o que poderá acontecer aos caudais das nascentes deste aquífero.

Admitindo que o armazenamento dentro do aquífero se mantém constante (pois depende quase totalmente das suas características físicas) e as perdas para aquíferos subjacentes se mantenham também constantes versus a recarga, a relação obtida entre recargas e caudais, para os vários cenários de alteração da precipitação analisados no Capítulo 5, é a seguinte (Quadro LXV):

Quadro LXV – Relação entre Caudais das Nascentes do Cabrito e Recargas em Cenários de Alteração da Precipitação

	Cenários de Variação da Precipitação								
	- 0,3 mm/d	- 0,5 mm/d	- 1 mm/d	- 15% anual	- 20% anual	Cenário 30 (1)	Cenário 20 (2)	Cenário 50 (3)	Cenário 60 (4)
Varição Média da Recarga (%)	-3,7	-6,0	-11,7	-17,2	-23,1	-17,2	-30,8	-6,5	-20,2
Nova Recarga (hm ³ /ano)	11,75	11,47	10,77	10,10	9,38	10,10	8,44	11,41	9,74
Armazenamento+Drenância	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50
Novos Caudais (hm ³ /ano)	7,25	6,97	6,27	5,60	4,88	5,60	3,94	6,91	5,24
Razão Caudais/Recarga (%)	61,70	60,76	58,23	55,45	52,03	55,45	46,70	60,55	53,78
Incremento de Caudais (%)	-5,86	-9,51	-18,54	-27,25	-36,60	-27,25	-48,80	-10,30	-32,01
	Cenários de Variação da Precipitação							Cenário 1 (5)	
	+ 6%	+ 10%	+ 15%	+ 20%	+ 25%	+ 30%			
Varição Média da Recarga (%)	+5,9	+10,9	+14,9	+21,1	+26,3	+31,5	+11,9		
Nova Recarga (hm ³ /ano)	12,92	13,53	14,02	14,77	15,41	16,04	13,65		
Armazenamento+Drenância	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50		
Novos Caudais (hm ³ /ano)	8,42	9,03	9,52	10,27	10,91	11,54	9,15		
Razão Caudais/Recarga (%)	12,92	13,53	14,02	14,77	15,41	16,04	13,65		
Incremento de Caudais (%)	9,35	17,27	23,61	33,43	41,67	49,91	18,85		

Nota: -15% anual e -20% anual significa que se afectou a série de uma redução de cerca de 15 e 20% respectivamente por dia, o que deu 15 e 20% respectivamente menos precipitação anual

- (1) precipitação a -30% Primavera, -15% no Verão, -35% no Outono, +20% no Inverno = -14,9% anual
- (2) precipitação a -30% Primavera, -15% no Verão, -60% no Outono, +20% no Inverno = -25,3% anual
- (3) precipitação a -30% Primavera, -15% no Verão, -35% no Outono, +50% no Inverno = - 5,8% anual
- (4) precipitação a -30% Primavera, -15% no Verão, -60% no Outono, +50% no Inverno = - 15,9% anual
- (5) precipitação a +15% na estação húmida e sem tendência de alteração no Verão

Para a variação da evapotranspiração a relação que se obtém entre recargas e caudais é a seguinte (Quadro LXVI):

Quadro LXVI – Relação entre Caudais das Nascentes do Cabrito e Recargas em Cenários de Alteração da Evapotranspiração

	Cenários de Variação da Evapotranspiração								
	+1,5%	+ 5%	+ 10%	+ 15%	+ 20%	+ 25%	+ 30%	+ 40%	+ 50%
Varição Média da Recarga (%)	-0,6	-2,1	-4,0	-5,9	-7,4	-9,2	-10,7	-13,6	-16,4
Nova Recarga (hm ³ /ano)	12,13	11,94	11,71	11,48	11,30	11,08	10,89	10,54	10,20
Armazenamento+Drenância	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50
Novos Caudais (hm ³ /ano)	7,63	7,44	7,21	6,98	6,80	6,58	6,39	6,04	5,70
Razão Caudais/Recarga (%)	62,89	62,32	61,58	60,80	60,17	59,38	58,70	57,31	55,88
Incremento de Caudais (%)	-0,95	-3,33	-6,34	-9,35	-11,72	-14,58	-16,95	-21,55	-25,98
	Cenários de Variação da Evapotranspiração								
	- 5%	- 10%	- 15%	- 20%	- 25%	- 30%			
Varição Média da Recarga (%)	+2,2	+4,4	+6,8	+9,2	+11,7	+14,2			
Nova Recarga (hm ³ /ano)	12,47	12,74	13,03	13,32	13,63	13,93			
Armazenamento+Drenância	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50			
Novos Caudais (hm ³ /ano)	7,97	8,24	8,53	8,82	9,13	9,43			
Razão Caudais/Recarga (%)	63,91	64,67	65,46	66,22	66,98	67,70			
Incremento de Caudais (%)	3,49	6,97	10,77	14,58	18,54	22,50			

Para os cenários de variação de precipitação e evapotranspiração admitidos no Capítulo 5, tem-se (Quadro LXVII):

Quadro LXVII – Relação entre Caudais das Nascentes do Cabrito e Recargas em Cenários de Alteração da Precipitação e Evapotranspiração mais Adequados aos Açores

	Cenários de Variação da Evapotranspiração e Precipitação	
	Cenário 1	
Variação Média da Recarga (%)	5,3	
Nova Recarga (hm ³ /ano)	12,85	
Armazenamento+Drenância	4,50	
Novos Caudais (hm ³ /ano)	8,35	
Razão Caudais/Recarga (%)	64,97	
Incremento de Caudais (%)	8,40	

Cenário 1 – Precipitação sobe cerca de 6%; evapotranspiração sobe 1,5%; valores obtidos segundo inferência de DROTRH e IA (2001).

Verifica-se assim que nestes cenários as alterações nos valores da evapotranspiração originam sempre menores variações (e de sinal oposto) na descarga das nascentes ao passo que a variação na precipitação origina sempre uma variação maior (e do mesmo sinal) nos caudais das mesmas nascentes. Ou seja, a variação da precipitação foi a que mais impacto teve ao nível dos caudais das nascentes, sendo que nos casos de redução, a conseqüente redução de caudais pode chegar aos 49%. De notar que este valor ocorre quando a maior diminuição se dá no Outono, apesar de no Inverno se registar uma subida da precipitação, o que aponta para a importância da distribuição sazonal das precipitações no regime de escoamento das nascentes.

8.4. Cenários de Variação de Recursos Disponíveis e Stress Hídrico face aos Cenários de Variação dos Consumos

Do relatório “Balanço Disponibilidades-Necessidades” (Oliveira e Marcão, 2001) do Plano Regional da Água, no estado actual (de “referência”), para a totalidade da ilha Terceira, os valores anuais de recargas, descargas de nascentes, necessidades e a relação entre necessidades, recarga e descargas de nascentes⁹⁰ são os que se apresentam no Quadro LXVIII:

Quadro LXVIII – Recursos Hídricos Subterrâneos Versus Necessidades da Ilha Terceira

Escoamento Superficial (hm ³ /ano)	Recarga (hm ³ /ano)	Descarga de Nascentes (hm ³ /ano)	Necessidades em Água (hm ³ /ano)	Necessidades/Recarga (%)	Necessidades/Nascentes (%)
205	193	18	6,60	3,42	36,7

Partindo de uma variação da recarga, para toda a ilha Terceira, conforme a que ficou definida para os diferentes cenários de alteração climática na área do Cabrito (cf. Capítulo 5) e admitindo uma variação dos caudais de nascentes conforme aos

⁹⁰ Uma das fontes importantes de abastecimento.

calculados nos Quadros LXV a LXVII, obtêm-se cenários de alteração dos recursos hídricos, os quais são apresentados no Quadro LXIX.

Quadro LXIX – Variação da Recarga e Caudais de Nascentes para os Vários Cenários de Alterações Climáticas

Cenários Alteração Climática	Variação Recarga (%)	Variação Caudais Nascentes (%)	Nova Recarga (hm ³ /ano)	Novos Caudais Nascentes (hm ³ /ano)	Relação Caudais/Recarga (%)
Actual	0	0	193	18	9,33
PP = - 0,3 mm/d	- 3,7	-5,86	185,86	16,94	9,12
PP = - 0,5 mm/d	- 6,0	-9,51	181,42	16,29	8,98
PP = - 1 mm/d	- 11,7	-18,54	170,42	14,66	8,60
PP = - 15%	- 17,2	-27,25	159,80	13,09	8,19
PP = - 20%	- 23,1	-36,60	148,42	11,41	7,69
Cenário 30	- 17,2	-27,25	159,80	13,09	8,19
Cenário 20	- 30,8	-48,80	133,56	9,22	6,90
Cenário 50	- 6,5	-10,30	180,46	16,15	8,95
Cenário 60	- 20,2	-32,01	154,01	12,24	7,95
PP = +6%	+ 5,9	+ 9,35	204,39	19,68	9,63
PP = +10%	+ 10,9	+ 17,27	214,04	21,11	9,86
PP = +15%	+ 14,9	+ 23,61	221,76	22,25	10,03
PP = +20%	+ 21,1	+ 33,43	233,72	24,02	10,28
PP = +25%	+ 26,3	+ 41,67	243,76	25,50	10,46
PP = +30%	+ 31,5	+ 49,91	253,80	26,98	10,63
Cenário 1	+ 11,9	+ 18,85	215,97	21,39	9,91
EVR = +1,5%	-0,60	-0,95	191,84	17,83	9,29
EVR = +5%	-2,10	-3,33	188,95	17,40	9,21
EVR = +10%	-4,00	-6,34	185,28	16,86	9,10
EVR = +15%	-5,90	-9,35	181,61	16,32	8,98
EVR = +20%	-7,40	-11,72	178,72	15,89	8,89
EVR = +25%	-9,20	-14,58	175,24	15,38	8,77
EVR = +30%	-10,70	-16,95	172,35	14,95	8,67
EVR = +40%	-13,60	-21,55	166,75	14,12	8,47
EVR = +50%	-16,40	-25,98	161,35	13,32	8,26
EVR = - 5%	+ 2,20	+ 3,49	197,25	18,63	9,44
EVR = - 10%	+ 4,40	+ 6,97	201,49	19,25	9,56
EVR = - 15%	+ 6,80	+ 10,77	206,12	19,94	9,67
EVR = - 20%	+ 9,20	+ 14,58	210,76	20,62	9,79
EVR = - 25%	+ 11,70	+ 18,54	215,58	21,34	9,90
EVR = -30%	+ 14,20	+ 22,50	220,41	22,05	10,00
Cenário 1 = + 6% PP, +1,5% EVR	+ 5,3	+ 8,40%	203,23	19,51	9,60

De referir que a expansão das variações da recarga para toda a ilha Terceira a partir dos dados obtidos no Cabrito pode ser discutível, dadas as diferentes condições de infiltração dos vários sistemas aquíferos; porém, como se refere no Capítulo 5, esta variação de recarga com que se trabalhou é um valor mediano para várias condições de infiltração que acabam por ser as mais representativas da ilha, logo pode, em primeira aproximação, representar as condições globais de infiltração/recarga da ilha. Para a questão dos caudais das nascentes admitiu-se que o volume de armazenamento se mantém constante para os vários cenários de alteração climática, e deste modo a variação nos caudais das nascentes depende directamente da variação na recarga e escoamentos superficiais, para toda a ilha Terceira. Partiu-se assim da situação de referência (relação actual recargas/caudais de nascentes), que se manteve constante,

calculando os caudais das nascentes a partir dos novos valores de recarga. Esta é uma simplificação, devida ao facto de efectivamente não existirem dados que permitam uma avaliação mais pormenorizada da evolução destas relações (precipitações vs. recargas vs. armazenamentos vs. caudais de nascentes) com as alterações climáticas, em especial porque a caracterização da situação de referência (actual) possui ainda diversas lacunas.

Considerando os cenários de consumos definidos nas páginas 196 a 198, e respectivos valores de consumos totais anuais, a análise dos volumes de recursos hídricos necessários para a satisfação dos consumos (e conseqüente stress hídrico) foi realizada para valores totais anuais; não se realizou, por ausência de dados representativos, uma análise sazonal (de invernia e de estiagem), a qual é bastante importante para definir as situações de ponta e a sua gravidade.

Assim, considerando as projecções de consumos apresentadas no Quadro LXIV, verifica-se que, caso estas projecções reflectam uma realidade dos consumos em cenários de alterações climáticas, estes não poderão ser satisfeitos apenas a partir das nascentes. Por essa razão calculou-se apenas a proporção consumos/recarga e não a proporção consumos/caudais de nascentes por se pressupor que, estando as projecções de consumos correctas, estes terão de ser abastecidos na sua maioria a partir de furos e poços. Tomando apenas o somatório total dos consumos (urbano + industrial + agropecuário), para a totalidade da ilha Terceira tem-se o seguinte conjunto de valores de stress hídrico, para os cenários de variação da precipitação e evapotranspiração (Quadro LXX):

Quadro LXX – Relação Consumos versus Recarga para os Diferentes Cenários de Alteração de Consumos e Alterações Climáticas

Cenários Alteração Climática	Nova Recarga (hm ³ /ano)	Novos Caudais Nascentes (hm ³ /ano)	Stress Hídrico			
			Cenário A2		Cenário B2	
			Cenário A %cons/RAQ	Cenário B %cons/RAQ	Cenário A %cons/RAQ	Cenário B %cons/RAQ
PP = - 0,3 mm/d	185,86	16,94	24,73	23,05	12,37	11,52
PP = - 0,5 mm/d	181,42	16,29	25,34	23,61	12,67	11,81
PP = - 1 mm/d	170,42	14,66	26,97	25,13	13,49	12,57
PP = - 15%	159,80	13,09	28,77	26,81	14,38	13,40
PP = - 20%	148,42	11,41	30,97	28,86	15,49	14,43
Cenário 30	159,80	13,09	28,77	26,81	14,38	13,40
Cenário 20	133,56	9,22	34,42	32,07	17,21	16,04
Cenário 50	180,46	16,15	25,47	23,74	12,74	11,87
Cenário 60	154,01	12,24	29,85	27,81	14,92	13,91
PP = +6%	204,39	19,68	22,49	20,96	11,25	10,48
PP = +10%	214,04	21,11	21,48	20,01	10,74	10,01
PP = +15%	221,76	22,25	20,73	19,32	10,36	9,66
PP = +20%	233,72	24,02	19,67	18,33	9,83	9,16
PP = +25%	243,76	25,50	18,86	17,57	9,43	8,79
PP = +30%	253,80	26,98	18,11	16,88	9,06	8,44
Cenário 1	215,97	21,39	21,28	19,83	10,64	9,92
EVR = +1,5%	191,84	17,83	23,96	22,33	11,98	11,16
EVR = +5%	188,95	17,40	24,33	22,67	12,16	11,34
EVR = +10%	185,28	16,86	24,81	23,12	12,41	11,56
EVR = +15%	181,61	16,32	25,31	23,59	12,66	11,79
EVR = +20%	178,72	15,89	25,72	23,97	12,86	11,98
EVR = +25%	175,24	15,38	26,23	24,44	13,12	12,22

Cenários Alteração Climática	Nova Recarga (hm ³ /ano)	Novos Caudais Nascentes (hm ³ /ano)	Stress Hídrico			
			Cenário A2		Cenário B2	
			Cenário A	Cenário B	Cenário A	Cenário B
			%cons/RAQ	%cons/RAQ	%cons/RAQ	%cons/RAQ
EVR = +30%	172,35	14,95	26,67	24,85	13,34	12,43
EVR = +40%	166,75	14,12	27,57	25,69	13,78	12,84
EVR = +50%	161,35	13,32	28,49	26,55	14,25	13,27
EVR = - 5%	197,25	18,63	23,30	21,72	11,65	10,86
EVR = - 10%	201,49	19,25	22,81	21,26	11,41	10,63
EVR = - 15%	206,12	19,94	22,30	20,78	11,15	10,39
EVR = - 20%	210,76	20,62	21,81	20,32	10,91	10,16
EVR = - 25%	215,58	21,34	21,32	19,87	10,66	9,93
EVR = -30%	220,41	22,05	20,86	19,43	10,43	9,72
Cenário 1 = +6% PP, +1,5% EVR	203,23	19,51	22,62	21,08	11,31	10,54

*cons = consumos totais da ilha Terceira (urbano+industrial+agro-pecuário); a relação Consumos/Recarga é dada em percentagem.

8.4.1. IMPACTOS DAS VARIAÇÕES DOS CONSUMOS NAS RESERVAS HÍDRICAS E EVOLUÇÃO DO STRESS HÍDRICO EM DIFERENTES CENÁRIOS DE ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS

Na situação actual, e de acordo com Oliveira e Marcão (2001), as necessidades actuais (6,6 hm³/ano), correspondem a cerca de 3,42% da recarga de aquíferos (contabilizada em 193 hm³/ano para toda a ilha Terceira). Se se considerarem as projecções de consumos para o ano 2100, *sem ter em conta as alterações climáticas* (cenários A e B do Plano Regional da Água, DROTRH e IA, 2001, cf. Quadros LX a LXIII), considerando a mesma recarga de 193 hm³/ano e o mesmo volume de caudais escoados pelas nascentes (18 hm³/ano) verifica-se que para qualquer dos dois cenários de evolução dos consumos as nascentes conseguem abastecer as necessidades, embora a taxa de exploração se situe acima dos 60% em ambos os cenários; para o volume total de recarga dos aquíferos, o total de consumos nunca ultrapassa os 15% (Quadro LXX).

Quadro LXXI – Relação Consumos versus Recarga e Caudais de Nascentes para Condições Climáticas Actuais (de referência) e Cenários de Evolução dos Consumos (sem considerar alterações climáticas)

Tipos de Consumos	Cenário A			Cenário B		
	Consumos (hm ³ /ano)	Consumos/RAQ (%)	Consumos/Q Nascentes (%)	Consumos (hm ³ /ano)	Consumos/RAQ (%)	Consumos/Q Nascentes (%)
Urbano	9,09	4,71	50,52	9,48	4,91	52,66
Industrial	1,28	0,66	7,08	0,75	0,39	4,16
Agro-pecuário	1,44	0,75	8,02	0,67	0,35	3,71
Total	11,81	6,12	65,62	10,90	5,65	60,53

Como se pode verificar do Quadro LXX a situação é bastante distinta quando se consideram acréscimos de consumos associados às alterações climáticas. Apesar da enorme incerteza na evolução dos consumos devidos ao aumento da temperatura, dada a pouca informação existente sobre esta matéria, pode verificar-se que as nascentes não

serão capazes de sustentar os consumos e estes terão de depender de extracções de furos de captação.

Verifica-se igualmente que mesmo nas condições mais favoráveis os consumos totais para a ilha Terceira perfazem no mínimo 8,4% (a azul; Quadro LXX) da recarga total e que nas condições mais desfavoráveis podem ultrapassar os 34% (a vermelho; Quadro LXX). Isto indicia forte pressão sobre os sistemas aquíferos, em particular se se considerar que, de acordo com o cenário A2 usado por SIAM, podem ocorrer quebras de precipitação de até 20%. Por exemplo, para este cenário A2, como se pode ver do Quadro LXX, as percentagens máximas de consumos versus recarga variam entre mais de 34% (vermelho; cenário de consumos A) a 32% (amarelo; cenário de consumos B). Naturalmente, estes valores estão dependentes da evolução de consumos que, como já se referiu, é bastante incerta quando se tenta projectar sobre estes mesmos consumos os efeitos das alterações climáticas. Refira-se mais um vez que os valores de consumos pressupostos são apenas um ensaio teórico, o qual pode desviar-se de modo significativo da realidade, pelo que se sugere que venha a ser realizada investigação nesta matéria, dada a sua importância para o estabelecimento de medidas de adaptação às alterações climáticas

A evolução dos consumos em face das alterações climáticas depende não só do aumento natural resultante da resposta a um clima mais quente mas também dependerá de estratégias de adaptação como uma maior eficiência nas redes de distribuição de água, com conseqüente redução de perdas de água, a adopção de culturas ou técnicas e espécies agro-pecuárias com menores requisitos em água per capita, a opção para actividades económicas ou de novas metodologias com menores consumos em água, o abandono puro e simples de algumas unidades de produção, alterações nos preços da água para consumo, etc.

Quando estes estudos estiverem realizados e forem estabelecido cenários concretos de evolução de consumos acomodando as alterações climáticas, os valores que agora se apresentam deverão ser reexaminados e recalculados para as novas projecções.

8.4.2. VULNERABILIDADE DOS AQUÍFEROS À ESTIAGEM E IMPACTOS DAS VARIAÇÕES DO STRESS HÍDRICO SOBRE OS AQUÍFEROS

Um dos principais aspectos que as alterações climáticas acarretam é a modificação dos regimes de precipitação e conseqüentemente, dos regimes de recarga dos aquíferos. Nalgumas regiões do globo tal modificação faz-se no sentido de um aumento dos valores médios anuais de precipitação enquanto que noutras regiões a evolução é no sentido de uma maior aridez. Para os aquíferos tal significa enfrentar condições distintas de estiagem, pelo que o conhecimento da sua vulnerabilidade à estiagem é um aspecto importante da compreensão da sua vulnerabilidade às alterações climáticas. No geral os aquíferos de maiores dimensões são menos susceptíveis aos episódios de estiagem dado a sua maior capacidade de armazenamento; por seu lado os aquíferos de pequenas dimensões tendem a ser muito mais susceptíveis e se a velocidade de circulação das águas for muito rápida e/ou estes forem muito superficiais, a sua susceptibilidade à estiagem torna-se elevada. No caso de uma rápida velocidade de

circulação pelo aquífero essa susceptibilidade é aumentada porque uma alta velocidade implica um rápido escoamento dos volumes de água para as zonas de descarga destes aquíferos. A superficialidade é também um factor de susceptibilidade dado que quanto mais superficiais estiverem os aquíferos, mais propensos estão a fenómenos de ascensão de água por capilaridade e consequentes perdas para a região radicular ou mesmo para a atmosfera, por adsorção das raízes ou evaporação pura e simples; uma localização muito superficial, numa região onde as estiagens sejam prolongadas, torna ainda os aquíferos susceptíveis aos efeitos de salinização pela lixiviação dos sais (quando dos eventos de infiltração) que entretanto se depositaram na zona vadosa devido aos mesmos processos de capilaridade. A alteração da evapotranspiração é também importante na questão dos processos de capilaridade e salinização por lixiviação da zona vadosa, verificando-se que, por exemplo, um aumento da evapotranspiração tende a incrementar a salinização dos solos e a transmissão de sais aos aquíferos aquando dos eventos de infiltração (SIAM, 2002).

Deste modo a susceptibilidade à estiagem está associada ao volume disponível para armazenamento num aquífero, sendo função da porosidade dos materiais e dimensões do aquífero, não sendo de excluir a sua superficialidade, dado que em aquíferos muito superficiais a remoção de água por evaporação e processos de ascensão de água à zona vadosa por capilaridade pode ter significado. Tal susceptibilidade (em especial o factor superficialidade) pode influenciar a vulnerabilidade à poluição, dado que pode permitir uma concentração dos poluentes nas águas, através da redução por evaporação dos volumes armazenados; porém, com base em observações em regiões semi-áridas, admite-se que o principal efeito da evaporação possa ser o de, por processos de ascensão de fluidos por capilaridade, originar acumulações salinas na região vadosa, as quais se que podem tornar fontes potenciais de salinização da zona saturada aquando da infiltração das águas ao início do ano hidrológico (ou por rega).

SIAM (2002), ao abordar esta temática para Portugal Continental, uma das regiões do globo que de acordo com os modelos climáticos globais e regionais tende para uma maior aridez, refere que os pequenos aquíferos podem não beneficiar do aumento nas chuvas de Inverno e podem não conseguir compensar os défices nos meses de Verão, mesmo se o aumento invernal de precipitação significar de facto um aumento da recarga. Nestas condições, segundo SIAM (2002), os aquíferos superficiais tenderão a ser mais afectados pelas modificações nos padrões sazonais de precipitação-escoamento superficial. Os aquíferos com grande capacidade de armazenamento poderão recuperar os défices de Verão com as possíveis maiores recargas de Inverno. No caso dos Açores uma parte importante dos aquíferos é muito superficial e muitos destes aquíferos são de pequenas dimensões (ex.: as escoadas que constituem o sistema aquífero Santa Bárbara Superior, ou o aquífero do Cabrito); no geral as nascentes, que são parte importante do abastecimento das populações, estão associadas a aquíferos superficiais.

No caso dos Açores os estudos de alterações climáticas desenvolvidas por SIAM (2005), usando dois cenários IPCC de emissões de gases de efeito de estufa – os cenários A2 e B2 – apontam para uma evolução no sentido da subida de temperatura. Para a precipitação o cenário A2 sugere a diminuição da precipitação média anual na

maior parte do território da ilha Terceira⁹¹, até um máximo de 6%, registando uma descida da precipitação de Verão, que pode ir até aos 45%; no cenário B2 regista-se uma subida da precipitação média anual até um máximo de 10%, verificando-se uma descida na precipitação de Verão até 30%; ambos os cenários registam uma subida das precipitações de Inverno, e uma descida nas precipitações de Primavera e Outono.

Tendo como ponto de partida este enquadramento, pretendeu-se criar uma metodologia de vulnerabilidade dos aquíferos à estiagem, dado que este será um factor importante na gestão dos recursos hídricos subterrâneos, em particular nas condições de alterações climáticas que os modelos parecem indicar. Como atrás se viu, os aquíferos podem ser susceptíveis a fenómenos de estiagem quer pela sua dimensão, como superficialidade ou reduzido tempo de permanência das águas. Assim considera-se como **vulnerabilidade à estiagem** a *incapacidade de um aquífero em manter a qualidade e volumes mínimos de recursos disponíveis para consumo durante um período alargado de estiagem*. Deste modo resulta que na análise da vulnerabilidade à estiagem se considerou que os três parâmetros base são:

- ◆ **Dimensão do Aquífero** – relaciona-se com o volume de água que o aquífero pode armazenar e posteriormente ceder, o que é um aspecto importante na susceptibilidade dos aquíferos à estiagem. Pequenos aquíferos têm em regra reduzida capacidade de armazenamento mesmo se a sua porosidade for elevada – ex.: aquífero do Cabrito, cf. Novo *et al.* (1997) – e num período de estiagem mais ou menos prolongado, os seus recursos e reservas são mais facilmente depleccionados do que os dum aquífero cujo volume de reservas seja elevado. Incidentalmente a significativa depleção de água pode criar condições favoráveis à mobilização de poluentes até às zonas de escoamento (seja áreas de drenância para aquíferos inferiores, seja nascentes), com um decaimento relativamente reduzido dado os curtos percursos existentes nos aquíferos de pequenas dimensões, em especial se os valores de condutividade hidráulica forem elevados, afectando assim a generalidade do aquífero;
- ◆ **Tempo de Residência** – associado à condutividade hidráulica das litologias, o tempo de residência é um indicador do tempo que a água que pode circular desde a zona de recarga até às áreas de descarga e portanto o tempo que estará disponível para extracção antes de se perder nas zonas de descarga; os tempos de residência são assim um indicador do tempo que decorrerá entre o último evento de recarga e o momento em que a nascente deixa de ter caudal. Em termos de qualidade os tempos de residência são um indicador do tempo que pode demorar a contaminar o aquífero em toda a sua extensão. Assim os tempos de residência são uma indicação da susceptibilidade de um aquífero à estiagem pois um aquífero que se esgota rapidamente é um aquífero cujos recursos sofrem fortes variações durante períodos prolongados de estiagem, podendo comprometer o abastecimento de nascentes e outros pontos de água durante tais períodos.
- ◆ **Distância à Superfície do Solo** – definida como a distância vertical entre a superfície do terreno e o tecto do aquífero, está relacionada sobretudo com a perda que pode ocorrer por evaporação e outros processos de extracção de água por capilaridade ou da facilidade de extracção desta mesma água por

⁹¹ No sector W e S regista-se um leve aumento, que pode ir até um máximo de 6%.

parte das plantas. Uma zona saturada muito profunda estará menos susceptível a ser alcançada e explorada por uma grande variedade e densidade de plantas (e sofrerá por consequência menores extracções de água) do que uma zona saturada muito superficial; o mesmo sucede relativamente aos processos de evaporação e remoção de água por capilaridade a partir da interface entre a zona vadosa e a zona saturada. Deste modo, em caso de estiagem, uma zona saturada profunda sofrerá menores extracções de água (quer por parte da evaporação directa, quer especialmente por acção evapotranspiração das plantas) que uma de localização mais superficial.

A isto deverá acrescer-se, ao analisar o impacto humano, o stress hídrico imposto a estes mesmos aquíferos.

A **dimensão dos aquíferos** pretende representar o volume de água que um aquífero pode armazenar e que estará disponível para consumo durante os períodos de sequia. Como se referiu, aquíferos de pequena dimensão tendem a esgotar-se mais rápida e completamente do que aquíferos de grandes dimensões; isto é especialmente evidente no caso de aquíferos com condutividades hidráulicas semelhantes, pois dada a menor extensão dos percursos até às áreas de descarga, para a mesma velocidade de circulação das águas, um aquífero de pequenas dimensões esgota-se mais depressa do que um de maiores dimensões. O volume de água que um aquífero pode armazenar é dado pelo produto da porosidade eficaz, espessura e área deste aquífero. Assim este parâmetro “dimensão dos aquíferos” deverá ser calculado por meio deste produto, segundo a expressão:

$$\text{Eq. 4: } D_m = P_e \times E_p \times A_r$$

Onde:

D_m = Dimensão do aquífero

P_e = Porosidade eficaz

E_p = Espessura do aquífero

A_r = Área do aquífero

Na ausência do conhecimento da espessura do aquífero, ter-se-á de determinar este parâmetro pelo cálculo da área vezes a porosidade eficaz. No caso de não se conhecer a porosidade eficaz ter-se-á de utilizar apenas a área do aquífero. Sendo que para diversas unidades aquíferas dos Açores os valores de porosidade eficaz são por vezes mal conhecidos, e a sua espessura é ainda mais susceptível de dúvidas, a área é o valor melhor conhecido e portanto o que mais facilmente se poderá utilizar na definição deste parâmetro; é por esta razão que no Quadro LXXII, a “Dimensão do Aquífero” surge simplesmente com as unidades em km^2 . Considerando as dimensões dos aquíferos mais superficiais na ilha Terceira (os que estão sujeitos aos efeitos da estiagem), dividiram-se estes em três classes, com base em intervalos médios que reflectem as classes de dimensões dos mesmos. Os aquíferos de alta sensibilidade serão os de mais

reduzidas dimensões, conforme ao que foi referido nos parágrafos acima, e os menos sensíveis, os de maiores dimensões. Deste modo, a avaliação deste parâmetro será (Quadro LXXII):

Quadro LXXII – Parâmetro Dimensão do Aquífero

Dimensão do aquífero: área média (km ²)	Sensibilidade	Parâmetro
< 10	Alta	10
10 – 30	Média	5
> 30	Baixa	1

Os **tempos de residência**, que podem ser reflectidos pelos parâmetros *condutividade + área dos aquíferos*, ou mais correctamente *condutividade + distância entre as zonas de recarga e as áreas de descarga*, determinam até certo ponto o tempo que um aquífero demora a perder água até as suas nascentes e outros pontos de descarga sequem.

Este aspecto desempenha também importante controle na vulnerabilidade dos aquíferos à poluição, ao reflectir a velocidade com que a água neles armazenada é renovada. Aquíferos em que a circulação das águas se processa rapidamente do ponto de entrada às zonas de saída (ex.: aquífero do Cabrito, cf. Novo *et al.*, 1997) podem ser rapidamente contaminados em toda a sua extensão, embora possam também apresentar o potencial para uma recuperação relativamente rápida se não se registar uma acentuada adsorção dos poluentes por parte da estrutura sólida do aquífero (que pode permitir, à posteriori a sua libertação para as águas quando a concentração de poluentes na fase dissolvida começar a diminuir). Em aquíferos onde as águas tenham longos tempos de residência, os poluentes demoram mais tempo a propagar-se (a circulação far-se-á no geral a velocidade mais baixa), tendo assim maior oportunidade para serem degradados e eventualmente eliminados, via degradação, decomposição, adsorção ou mesmo pela actividade de microorganismos. Basicamente o tempo de residência pretende dar uma avaliação do tempo de depleção do aquífero (por oposição ao parâmetro “Dimensão dos aquíferos” que pretende avaliar o volume de água que aquífero pode perder até ao seu exaurimento). No caso de não se conhecerem os tempos de residência, uma alternativa admissível é a de usar os valores da condutividade hidráulica. Os valores escolhidos para os intervalos relacionam-se com os tempos de residência conhecidos para aquíferos de muito alta condutividade hidráulica e muito reduzida dimensão (ex.: Cabrito), com as dimensões e condutividades hidráulicas dos aquíferos de média dimensão e de grande dimensão. Para os tempos de residência ter-se-á a classificação (Quadro LXXIII):

Quadro LXXIII – Parâmetro Tempo de Residência no Aquífero

Tempos de residência (dias)	Sensibilidade	Parâmetro
<30	Alta	10
30 – 90	Média	5
> 90	Baixa	1

No caso de se utilizar a condutividade hidráulica, deveria conhecer-se pelo menos a distância entre as áreas de recarga e as de descarga, de modo a obter-se um cálculo aproximado dos tempos de residência. Contudo, em meios vulcânicos, as ligações entre as zonas de recarga e as áreas de descarga estão sujeitas à grande heterogeneidade destes meios, o que pode complicar bastante o problema. Sendo difícil de definir com exactidão para cada aquífero da ilha Terceira cada área de recarga e sua(s) correspondente(s) área(s) de descarga, e/ou tempos de residência, o que abaixo se sugere é uma simplificação do problema, em que são estabelecidas classes de sensibilidade à estiagem em função dos intervalos de valores de condutividade hidráulica das formações para a ilha Terceira, tomando em consideração que nesta ilha os aquíferos têm áreas que se situam dentro da mesma ordem de grandeza⁹². Assim a classificação deste parâmetro virá (Quadro LXXIV):

Quadro LXXIV – Parâmetro Tempo de Residência (avaliado pela condutividade hidráulica) no Aquífero

Condutividade hidráulica (m/d)	Sensibilidade	Parâmetro
> 1 000	Alta	10
100 – 1 000	Média	5
<100	Baixa	1

A **distância à superfície do solo**, afecta tanto a quantidade como a qualidade das águas num aquífero. Numa área sujeita a estiagem e onde a evaporação se torne intensa, a ascensão de água por fenómenos de capilaridade pode originar a acumulações salinas na região vadosa; tais acumulações são potenciais fontes de salinização dos aquíferos, em especial se houver actividade de regadio, a qual promoverá a infiltração de águas que atravessam estas acumulações salinas, transportando os sais para a zona saturada. Ao mesmo tempo uma menor distância do nível de água à superfície do solo pode disponibilizar mais água para a evapotranspiração, resultando numa mais rápida depleção do aquífero, caso este tenha uma reduzida capacidade de armazenamento; contudo uma grande proximidade do nível freático à superfície do solo pode também limitar o desenvolvimento das comunidades vegetais e portanto o volume de água evapotranspirado. Assim, considerando o leque de profundidades médias dos sistemas aquíferos na ilha Terceira, ter-se-á a seguinte classificação para a distância à superfície do solo (Quadro LXXV):

Quadro LXXV – Parâmetro Distância à Superfície do Solo

Distância à superfície do solo (m)	Sensibilidade	Parâmetro
<10	Alta	10
10 – 20	Média	5
> 20	Baixa	1

Sendo então que a **vulnerabilidade à estiagem** é, neste método, dependente da dimensão do aquífero, tempo de residência das águas e profundidade do topo do aquífero, o respectivo índice de vulnerabilidade é calculado por:

⁹² As áreas dos aquíferos da Terceira variam entre cerca de 10 e 85 km², havendo apenas dois inferiores a 10 km² (Serra da Ribeirinha = 9,5 km² e Serra de Santiago = 4,9 km²).

Eq. 5: $E = (1 \times D_m + 1 \times TR + 1 \times Pr)/3$

Onde:

E = Índice vulnerabilidade à estiagem

D_m = Dimensão do aquífero

TR = Tempo de residência das águas

Pr = Distância à superfície do solo (profundidade do aquífero)

Sendo definidas as seguintes classes de vulnerabilidade (Quadro LXXVI):

Quadro LXXVI – Classes de Vulnerabilidade à Estiagem

Índice	Classe de Vulnerabilidade
7 – 10	Alta
4 – 7	Média
1 – 4	Baixa

Este índice deverá ser refinado em estudos futuros, nomeadamente em termos da importância relativa de cada um dos parâmetros, pois o que agora se apresenta é apenas uma primeira abordagem ao problema. Esta é a principal razão porque, na fase actual do desenvolvimento desta metodologia de avaliação da vulnerabilidade dos aquíferos à estiagem, se optou por atribuir aos três parâmetros em questão o mesmo peso ponderal.

Com base no acima exposto, para os vários sistemas aquíferos da ilha Terceira, a vulnerabilidade à estiagem, sem considerar os impactos gerados pelo stress hídrico, será dada por (Quadro LXXVII):

Quadro LXXVII – Vulnerabilidade à Estiagem dos Aquíferos da Ilha Terceira

Sistemas Aquíferos	Dimensão Aquífero	Tempo Residência	Distância Superfície	Índice	Classe de Vulnerabilidade
Caldeira	Cabrito	10	10	10	Alta
Guilherme Moniz-São Sebastião	S. Sebastião	5	--	5	Média
	Cinco Picos	1	--	10	Média
Cume	5	--	10	7,5	Alta
Ribeirinha	10	--	10	10	Alta
Grabén	5	--	5	5	Média
Ignimbritos das Lajes	1	--	10	5,5	Média
Serra de Santiago	10	--	5	7,5	Alta
Central	5	--	5	5	Média
Labçal-Quatro Ribeiras	1	--	10	5,5	Média
Biscoitos-Terra Chã	1	--	1	1	Baixa
Santa Bárbara Superior	10 (1)	10	10	10	Alta
Santa Bárbara Inferior	1	--	10	5,5	Média

(1) foram consideradas as dimensões das escoadas individuais dado que estas não apresentam continuidade lateral entre si, e a área total deste sistema (cf. Quadro XLIII) não representa a expressão em área de cada escoada mas apenas o somatório do seu conjunto.

Não sendo conhecidos os tempos de residência da generalidade dos sistemas aquíferos nem a profundidade dos níveis produtivos mais superficiais, com a excepção

do sector Cabrito (cf. Novo *et al.*, 1997), optou-se por calcular este índice apenas considerando a dimensão do aquífero e a distância à superfície do solo para o aquífero mais superficial de cada sistema. Obtém-se assim uma média ponderada e a classificação é feita a partir da mesma, considerando que, em estudos posteriores, quando forem determinados os tempos de residência dos aquíferos mais superficiais dos sistemas aquíferos e houver um melhor conhecimento da distância ao nível do solo, esta classificação que agora se apresenta possa vir a ser modificada.

Esta distância à superfície é apenas uma estimativa aproximada, conforme a Novo *et al.* (2001). No caso do sector Cinco Picos, do sistema aquífero de Guilherme Moniz-S. Sebastião, dado que nas épocas húmidas o aquífero mais superficial costuma interceptar a superfície do terreno (cf. Plano Regional da Água, DRORTH e IA, 2001; Menezes, 1993) optou-se por considerar a pior situação e admitir uma distância à superfície do solo inferior a 10 m, mesmo reconhecendo que noutras zonas deste sector a situação possa ser algo distinta.

Considerando agora o stress hídrico, tal como ficou definido no Quadro LXX, e tendo em conta a área dos aquíferos e o seu índice de vulnerabilidade à estiagem (Quadro LXXVII), é de admitir que os aquíferos mais susceptíveis sofram uma forte depleção dos seus recursos. Contudo, para uma análise concreta deste aspecto seria necessário conhecer: (1) cenários concretos de evolução dos consumos, (2) volumes de água extraída actualmente em cada sistema aquífero para cada tipo de actividade económica (volumes totais por sector económico por sistema aquífero), (3) tempos de residência das águas em cada sistema aquífero. Nenhum destes aspectos é actualmente conhecido com detalhe suficiente para se poder realizar tal análise.

9. ANÁLISE DA INCERTEZA ASSOCIADA AOS CENÁRIOS DE ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS E VARIÁVEIS HIDROLÓGICAS

Neste capítulo apresenta-se uma introdução à análise da incerteza associada a cenários de alterações climáticas no que se refere às mudanças nas variáveis hidrogeológicas e outros processos associados. Os aspectos da incerteza em consideração foram os seguintes:

- ◆ **Incerteza das projecções da subida do nível do mar;**
- ◆ **Incerteza das variáveis hidrológicas** – precipitação, escoamento superficial, evapotranspiração, recarga;
- ◆ **Incerteza dos impactos das alterações climáticas sobre a recarga.**

A incerteza associada à análise dos efeitos das alterações climáticas deve-se a:

1. Cenários de alterações climáticas utilizados, sobretudo na definição dos impactos dos gases de efeito de estufa sobre a atmosfera;
2. Imprevisibilidade dos sistemas climáticos (ou seja, um mesmo modelo num mesmo cenário de emissões gerará diferentes respostas climáticas, dependendo das condições de partida);
3. Variabilidade natural do clima;
4. Variabilidade climática a escalas inferiores às da malha dos modelos;
5. Erros nos dados de entrada ou modelos incompletos;
6. Alterações ao longo do tempo da estrutura dos modelos ou dos seus parâmetros (ou do fenómeno em modelação, o qual se vai afastando da estrutura do modelo);
7. Imprevisibilidade sistémica;
8. Estrutura dos modelos – relacionada com as funções e variáveis de previsão que definem/estruturam os modelos. Em muitos casos o aumento da dimensão e/ou complexidade dos modelos pode reduzir a incerteza mas apenas até um certo ponto; a partir de dado limite este aumento pode de facto gerar um aumento da incerteza. Esta é uma importante fonte de incerteza e tem um possível impacto significativo nos resultados da análise;
9. Estrutura errónea ou desconhecida dos parâmetros dos modelos.

9.1. Metodologias de Análise da Incerteza

As metodologias da análise da incerteza são diversas, variando no tipo de abordagem e grau de complexidade, como se pode verificar nas pgs. 34 a 37 desta dissertação, sendo de destacar entre estas:

- *Avaliação de especialistas;*
- *Análise estatística;*
- **Quantificação formal da incerteza** – onde se destacam: análise probabilística, onde se incluem os processos de estatística bayesiana, técnicas de Monte Carlo, cadeias de Markov, etc.;
 - *Estatística Bayesiana* – analisa a incerteza associada dos modelos através das técnicas de “averaging”;
 - *Análise de Monte Carlo* – usada na análise das incertezas associadas aos parâmetros e dados de entrada dos modelos, sendo por vezes usada na análise da incerteza dos resultados dos modelos climáticos globais;
- **Técnicas de downscaling** – onde se incluem:
 - *Downscaling dinâmico* – mais focado para a transformação de modelos climáticos globais em modelos climáticos regionais que especificamente para a análise da incerteza;
 - *Downscaling estatístico* – neste tipo de técnicas incluem-se: (1) regressão; (2) probabilidades condicionais; (3) reamostragem.

9.2. Análise da Incerteza Associada às Alterações do Nível do Mar

Para a análise da incerteza associada às alterações do nível do mar foram escolhidos os métodos de análise estatística por serem métodos comparativamente simples, adaptados ao tipo de informação que se encontra disponível sobre as alterações do nível do mar na ilha Terceira. Esta informação é um conjunto de valores pontuais, discretos, espaçados no tempo, de uma grandeza simples (cota do nível do mar em relação a um datum fixo), cujo registo apresenta numerosos e por vezes extensos hiatos ao longo dos anos de observação. A metodologia geoestatística para avaliar a estrutura destes dados foi a dos variogramas; a análise da estrutura dos dados permite a definição das incertezas associadas aos mesmos e aos hiatos de informação que existem nas séries destas medições.

9.2.1. DISCUSSÃO DO PROBLEMA E RESULTADOS

A incerteza associada às alterações do nível do mar resulta de: (1) incerteza nos dados de medição dos níveis do mar associada à própria medição em si, (2) hiatos nas medições dos níveis do mar, (3) sobreposição das variações eustáticas e outros efeitos locais; (4) reduzido conhecimento da evolução das variações eustáticas, sobretudo em termos quantitativos, etc.; (5) incerteza intrínseca ao processo das alterações climáticas.

Uma das primeiras abordagens à incerteza consiste no estudo dos semi-variogramas da variável que se pretende analisar. Para as alterações do nível do mar nos Açores, os semi-variogramas realizados para valores anuais e mensais referem-se à estação de Angra do Heroísmo. Os semi-variogramas efectuados para a ilha Terceira apresentam-se nas Figs. 63 e 64.

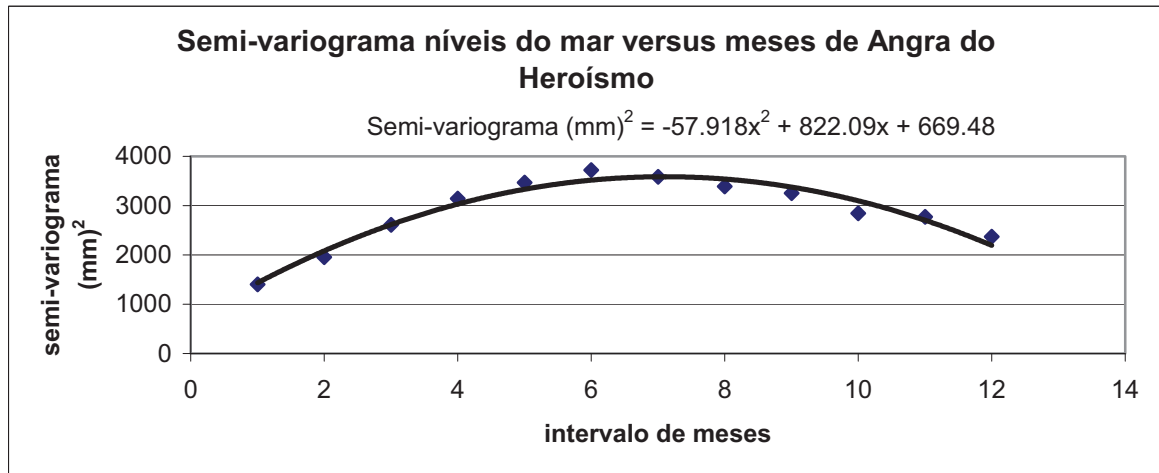


Figura 63 – Semi-variograma dos Níveis do Mar (valores mensais) para a Estação de Angra do Heroísmo

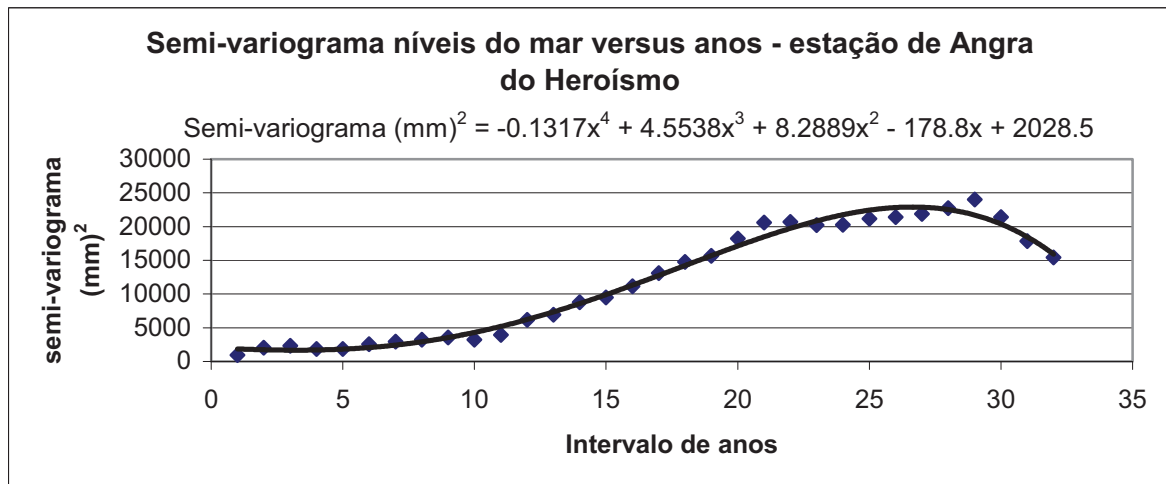


Figura 64 – Semi-variograma dos Níveis do Mar (valores anuais) para a Estação de Angra do Heroísmo

Destes gráficos pode inferir-se a existência de vários factores de variância para o semi-variograma de valores anuais. Para mais informação sobre a interpretação de variogramas e semi-variogramas aconselha-se a consulta de Journel (1989), Gringarten e Deutsch (1999) e Soares (2000).

9.3. Análise da Incerteza dos Resultados dos Cenários de Alterações Climáticas sobre a Recarga

Uma fonte de incerteza relacionada com os cenários de alterações climáticas ocorre na tradução das alterações climáticas nas séries de dados que vão funcionar como dados de entrada em modelos hidrológicos (ex.. modelos de balanço hídrico) ou de análise de impactos. Embora na maior parte dos casos de modelos hidrológicos se trabalhe com séries de precipitação alteradas de acordo com os resultados dos modelos climáticos, na verdade este tipo de procedimentos (e de séries “alteradas”) não permite definir os efeitos das potenciais alterações na variabilidade do clima em termos diários ou anuais; por outro lado a incorporação de modelos climáticos para gerar séries estocásticas de precipitação diárias nas condições climáticas actuais e futuras permite a análise da variabilidade mas pode por vezes mostrar-se muito pouco eficaz na criação de séries de precipitação realistas (Arnell, 1999). Assim, segundo este autor, o processo de criação de séries diárias de dados pode ter uma influência muito importante na “credibilidade” das alterações simuladas.

A análise da incerteza associada à previsão dos resultados da recarga previstos com base na informação dos cenários de alterações climáticas, exige a análise da incerteza associada à precipitação e evapotranspiração determinados a partir dos resultados dos modelos climáticos globais e regionais, e aos resultados do escoamento superficial e da própria recarga, dados pelos modelos de balanço hídrico. Considera-se não ser necessário realizar a análise de incerteza associada aos próprios modelos climáticos dado esta ter sido já abordada pelas equipas de especialistas que utilizaram os modelos climáticos globais e regionais utilizados para Portugal Continental (SIAM; 2002) e desenvolveram os modelos regionais usados para o estudo das alterações climáticas nos Açores (SIAM, 2005).

Resumidamente, além das fontes de incerteza enunciadas acima, deve ainda considerar-se, no caso dos modelos climáticos e dos modelos de balanço hídrico as seguintes fontes de incerteza (Katz, 2001):

- **Erros de medição** – refere-se aos erros aleatórios e sistemáticos;
- **Variabilidade dos processos envolvidos** – refere-se à variação sistemática dos fenómenos no espaço e no tempo e à aleatoriedade inerente aos fenómenos;
- **Estrutura dos modelos;**
- **Efeitos de escala e agregação** – escala de funcionamento espacial ou temporal (ou nível de agregação) do modelo e/ou dos dados.

A que se associam, de modo indirecto: (1) a interpretação dos resultados dos modelos climáticos globais, nomeadamente se estes resultados são pontuais ou uma média espacial por unidade de área (ex.: pixel); (2) a questão dos extremos/eventos surpresa, sendo que neste último caso a maioria dos estudos estatísticos se baseia em distribuições de probabilidade com uma cauda à direita “média” quando variáveis como escoamentos superficiais e precipitação, por exemplo parecem ter distribuições com caudas à direita “pesadas” o que leva a que os eventos designados nos estudos como

“extremos” ou “surpresa” apresentam na realidade uma probabilidade de ocorrência mais elevada do que o suposto. De acordo com Hulme e Carter (in Carter *et al.*, 1999) pode ser importante incorporar, de modo estatístico estes eventos “surpresa” na construção dos cenários de alteração climática, embora definir a probabilidade destes eventos se mostre ainda difícil, tendo de se recorrer à análise de painéis de especialistas e/ou simulações de Monte Carlo para a sua definição.

9.3.1. INCERTEZA ASSOCIADA À PREVISÃO DAS PRECIPITAÇÕES: DISCUSSÃO DO PROBLEMA

A incerteza associada à previsão das precipitações resulta de: (1) variabilidade intrínseca da precipitação, (2) incertezas na evolução das taxas de emissão de gases com efeitos de estufa, (3) incertezas nos efeitos dessas emissões sobre o ciclo da água, (4) tipos de modelos de simulação das precipitações utilizados (regionais, globais, etc.), (5) incertezas intrínsecas à estrutura dos modelos, (6) incertezas devido à transformação de modelos globais para modelos à escala regional e local.

A incerteza relativa à representatividade do processo atmosférico de precipitação por parte dos modelos regionais utilizados para os Açores foi minorada ao usar-se como base de partida um modelo climático global cujos graus de incerteza dos seus resultados tem sido avaliados a nível global (o modelo do Hadley Center HadCM3 GCM), e que se tornou referência neste campo de estudo. Este modelo foi regionalizado para os Açores via técnicas de downscaling, utilizando o modelo CIELO (Azevedo, 1996). O modelo CIELO é um modelo climático local construído para as condições de circulação atmosférica da ilha Terceira, que tem dado resultados bastante similares aos valores reais observados nas estações meteorológicas e udométricas desta ilha, representando com grande fiabilidade os meteoros e sua variação espaço-temporal na ilha. As técnicas de downscaling usadas permitiram reduzir a incerteza associada à transposição do modelo global HadCM3 GCM para a escala regional apropriada para os Açores.

9.3.2. INCERTEZA NA PREVISÃO DAS EVAPOTRANSPIRAÇÕES: DISCUSSÃO DO PROBLEMA

A incerteza associada à previsão das evapotranspirações resulta de: (1) variabilidade intrínseca do processo de evapotranspiração, (2) incertezas na evolução das taxas de emissão de gases com efeitos de estufa, o que determina a incerteza na evolução das temperaturas atmosféricas, (3) incerteza quanto às modificações do coberto vegetal sob novas condições climáticas, (4) incerteza quanto aos volumes de água disponível nos sistemas hídricos para evapotranspiração.

O último grupo de incertezas pode ser abordado a partir da construção de cenários, baseados nas possíveis evolução das precipitações e recargas de aquíferos para diferentes cenários de evolução do clima (o que depende de cenários de emissões de gases de efeitos de estufa).

O penúltimo grupo de incertezas poderá ser abordado via estudos experimentais da evolução das comunidades vegetais a condições climáticas em modificação,

associados com estudos de modificação das disponibilidades hídricas e respectivos impactos sobre as comunidades vegetais (ecohidrologia).

9.3.3. MODELAÇÃO DA INCERTEZA ASSOCIADA À PREVISÃO DOS ESCOAMENTOS SUPERFICIAIS: DISCUSSÃO DO PROBLEMA

A incerteza associada à previsão do escoamento superficial resulta de: (1) variabilidade intrínseca do processo de escoamento superficial, (2) incertezas na evolução das taxas de emissão de gases com efeitos de estufa, (3) incerteza quanto às modificações do coberto vegetal sob novas condições climáticas e sua capacidade de retenção da água, (4) tipos de modelos de balanço hídrico usados para calcular o escoamento superficial, (5) incertezas intrínsecas à estrutura destes modelos, (6) incertezas associadas aos dados de entrada do modelo.

As incertezas associadas ao grupo (3) podem ser tratadas como já foi referido no ponto 9.3.2. As incertezas associadas ao grupo (4) poderão ser minoradas utilizando modelos suficientemente detalhados que abranjam todos os factores que influenciam no escoamento superficial; contudo este tipo de modelos requer no geral uma quantidade de dados raramente disponíveis na sua totalidade e o acumular de incertezas relativos a estes dados de entrada constituirá importante fonte na incerteza dos resultados finais do modelo. As incertezas associadas ao grupo (6) podem apenas ser minoradas com uma recolha intensiva dos diversos dados de entrada, minorando erros de determinação até ao limite possível.

9.3.4. MODELAÇÃO DA INCERTEZA ASSOCIADA À PREVISÃO DAS RECARGAS: DISCUSSÃO DO PROBLEMA

A incerteza associada à previsão das recargas resulta de: (1) variabilidade intrínseca do processo de recarga, (2) incertezas na evolução das taxas de emissão de gases com efeitos de estufa, (3) incerteza quanto às modificações do coberto vegetal sob novas condições climáticas e sua capacidade de interferir na recarga, (4) incertezas associadas à capacidade de infiltração dos terrenos, (5) incertezas associadas às taxas de água infiltradas que efectivamente se transformam em recarga de aquíferos, (6) incertezas associadas ao volume de armazenamento dos aquíferos, (7) incertezas associadas ao tipo de água perdida pelos aquíferos por processos como a drenância ou outros, (8) tipos de modelos de balanço hídrico usados para calcular a recarga, (9) incertezas intrínsecas à estrutura destes modelos, (10) incertezas associadas aos dados de entrada do modelo.

A incerteza começa no tipo de dados disponíveis. Timlin *et al.* (2002) referem que na **determinação da recarga de aquíferos** se utiliza com frequência dados de precipitação e evapotranspiração diários ou variações na cota dos níveis piezométricos e que estes tipos de dados podem levar ao aparecimento de incertezas na estimativa da recarga. Estes autores ao investigarem o uso de registos quase contínuos de variação dos níveis piezométricos para o cálculo da recarga verificaram que estes registavam muitas vezes respostas muito rápidas aos eventos de precipitação em aquíferos muito superficiais e a ocorrência de recargas episódicas muito significativas. Assim, de acordo

com estes autores o uso de medições muito frequentes das variações dos níveis piezométricos podem reduzir a incerteza da estimativa da recarga face aos métodos de cálculo de recarga que utilizam dados meteorológicos ou os que usam medições diárias ou semanais destes mesmos níveis piezométricos. Timlin *et al.* (2000), designando por incerteza a perda de informação devida a uma monitorização intermitente (ou de grandes intervalos periódicos de recolha de dados), refere que uma monitorização deste tipo para eventos altamente transientes (ex.: recarga de aquíferos) podem levar a uma grande perda de informação e consequente incerteza na quantificação destes mesmos fenómenos.

A incerteza começa ao nível das propriedades e comportamento do meio poroso. Este aspecto tem sido muito estudado na indústria petrolífera e um desses exemplos é o trabalho de Christie (2000). Este autor define uma metodologia de quantificação da incerteza na performance de reservatórios naturais, baseada num algoritmo de amostragem estocástico designado por Algoritmo de Vizinhança (“Neighbourhood Algorithm”). Este algoritmo realiza uma amostragem adaptativa no espaço dos parâmetros usando as propriedades geométricas das células Voronoi para eliminar o enviesamento da amostragem para regiões de bom ajustamento aos dados, via métodos de cadeias de Markov Monte Carlo. Esta metodologia foi aplicada pelos autores ao estudo de reservatórios petrolíferos, no cálculo de pressões do reservatório e relações de concentração petróleo/água, tendo por objectivo criar vários modelos que podem ajustar-se às observações de campo e prever ao mesmo tempo o intervalo de valores possíveis das relações de concentração petróleo/água para um espaço de até 2000 dias. Por seu lado Oliver (2002), referindo que as metodologias Monte Carlo são as mais comuns de quantificação da incerteza nos processos sub-superficiais, discute as condições necessárias para que um método de cadeias de Markov Monte Carlo seja efectivamente eficiente na análise de incerteza nas previsões de comportamento de reservatórios subterrâneos, demonstrando como a calibração pode ser utilizada para incrementar a eficiência destes métodos. Este autor considera também um algoritmo de aproximação, o qual, de acordo com experimentações numéricas, se mostra útil no cálculo da incerteza dos processos sub-superficiais. Ainda dentro deste âmbito Caers (2002) propõe uma metodologia de “ajuste histórico” (history matching) baseado em informação cartográfica raster, para a definição das características geológicas dos reservatórios. Nesta metodologia a heterogeneidade geológica é definida a partir de padrões multi pontuais e respectivos parâmetros estatísticos, inferidos a partir de imagens (fotos aéreas, etc.); um algoritmo de simulação sequencial processa esta informação acoplando-a à informação proveniente das sondagens e furos de extração e de seguida a geoestatística multi pontual é associada a um processo de cadeia uni-paramétrica de Markov por forma a criar o ajuste histórico com os dados observados, de modo a que o modelo final obtido possa reproduzir a estrutura geológica inferida das imagens do terreno.

Outra área geradora de incertezas refere-se aos próprios processos envolvidos no ciclo da água, como por exemplo os fenómenos de recarga que, dada a sua variabilidade e complexidade, são de per si geradores de incerteza ao nível tanto dos dados de base como ao da sua modelação. Neste âmbito Bekesi e McConchie (1997) realizaram o cálculo da recarga regional na região de Manawatu, Nova Zelândia,

recorrendo à recarga média anual por meio de métodos de Monte Carlo, calculando ao mesmo tempo a incerteza associada a todo o processo. O modelo conceptual por detrás da modelação é o da recarga ocorrer sempre que a capacidade de campo do solo é excedida. Os autores utilizaram uma distribuição aleatória dos parâmetros de humidade do solo por forma a modelar a variabilidade intrínseca do meio; o cálculo da recarga foi realizado através de 300 simulações para cada estação, sendo a incerteza da recarga expressa por meio do desvio padrão da recarga média anual. A sensibilidade dos resultados da recarga face aos dados de entrada no modelo foi também calculada através do método de regressão linear segundo os mínimos quadrados, sendo a sensibilidade dada pelo valor do coeficiente de regressão estandardizado.

Este capítulo, mais do que uma análise específica das incertezas associadas à multitude de factores relacionados com os impactos das alterações climáticas sobre os recursos hídricos subterrâneos pretendeu essencialmente discutir alguns dos aspectos associados a estas incertezas, visto várias destas áreas serem bastante específicas e um pouco fora do âmbito da Hidrogeologia.

10. VULNERABILIDADE DOS AQUÍFEROS ÀS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS

Neste capítulo será analisada a vulnerabilidade dos sistemas aquíferos às alterações climáticas incluindo os aspectos relativos à vulnerabilidade à subida do nível do mar, modificações na vulnerabilidade à poluição e efeitos das acções antrópicas modificadas por estas mesmas alterações climáticas, por forma a estabelecer uma metodologia de avaliação da vulnerabilidade dos sistemas aquíferos às alterações climáticas.

Dado as alterações climáticas poderem modificar as correntes atmosféricas e oceânicas, temperaturas, evapotranspiração, magnitude das tempestades e precipitação, vitais para os recursos hídricos – com consequentes impactos nos ecossistemas, na agricultura (ex.: aumento dos consumos no regadio ou modificação da distribuição das culturas e dos processos de cultivo), e substractos físicos⁹³ – é necessário compreender os impactos das alterações climáticas sobre os recursos hídricos, e portanto a vulnerabilidade destes a tais alterações.

Além dos aspectos de mudança nas componentes climáticas, outro dos aspectos a ter em consideração, e que nas zonas costeiras e insulares afecta os aquíferos costeiros e/ou de base, é a subida do nível do mar, que têm uma grande influência na evolução do litoral a longo prazo (Ferreira *et al.*, in press; Ferreira, *et al.*, 1988). Como se viu no Anexo 1 e Capítulo 7, a subida do nível do mar pode agredir os aquíferos costeiros tanto através da submersão das franjas costeiras, como do aumento da erosão (e consequente redução da área dos aquíferos, no caso das zonas insulares) ou da capacidade para incrementar a intrusão salina (e portanto afectar a qualidade dos aquíferos).

Assim, um dos aspectos a ter em consideração na vulnerabilidade dos aquíferos às alterações climáticas é a da sua vulnerabilidade à poluição, que como veremos adiante, é uma das componentes de algumas metodologias de análise da vulnerabilidade dos sistemas aquíferos às alterações climáticas.

Quando se estuda a vulnerabilidade dos sistemas aquíferos às alterações climáticas deve ter-se em mente dois aspectos: (1) o aspecto quantitativo, (2) o aspecto qualitativo (ou seja, a sua vulnerabilidade à poluição). Uma definição possível de **vulnerabilidade às alterações climáticas** é “*o grau de incapacidade de um sistema em se adaptar às consequências das alterações climáticas*” (Nicholls, 1998). Ou seja, no caso dos sistemas hídricos, a *incapacidade para manterem a quantidade e qualidade dos seus recursos*. Esta vulnerabilidade, deve subdividir-se em duas componentes: (1) a **vulnerabilidade do sistema natural** e (2) **vulnerabilidade do sistema sócio-económico**. Na prática a vulnerabilidade, segundo o mesmo autor, engloba: (A) a **susceptibilidade** do sistema aos efeitos da alteração e (B) capacidade natural para se adaptar a estes efeitos (**resiliência** e **resistência**). A **susceptibilidade** reflecte o potencial do sistema

⁹³ As modificações sobre os solos não são em directo um impacto sobre os recursos hídricos mas acabam por ter significativa influência pois a alteração dos solos (ex.: via erosão) condiciona a taxa de infiltração e portanto, indirectamente, a recarga dos aquíferos.

para ser afectado pelas alterações climáticas, a **resistência** descreve a capacidade do sistema para evitar a perturbação face a estas alterações e a **resiliência** descreve a velocidade a que um sistema retorna ao seu estado original após ter sido perturbado (Nicholls, 1998).

Devem ser ainda considerados, na análise global dos impactos das alterações climáticas, os conceitos de **Dano** (*redução de diversidade, extensão, qualidade, e funcionamento dos ecossistemas*) e **Degradação**, isto é, um *dano irreversível* (Briguglio *et al.*, 1999), cuja intensidade está dependente da intensidade da perturbação e da vulnerabilidade a essa perturbação por parte do sistema afectado.

Segundo SURVAS (2000) a vulnerabilidade às alterações climáticas é de dois tipos:

- **A Vulnerabilidade Natural dos Sistemas** – que é função da:
 - **Susceptibilidade Natural**, isto é, o potencial do sistema em ser afectado pelas alterações do clima (e/ou do nível do mar), que é em larga medida independente das influências humanas.
 - **Resistência e Resiliência**, que são fortemente influenciadas pela acção humana, consistem em:
 - **Resiliência** – a velocidade a que o um sistema regressa ao seu estado natural após ter sido perturbado;
 - **Resistência** – a capacidade do sistema evitar ser perturbado.
 - **Capacidade de Adaptação Autónoma** – resposta expontânea do sistema à alteração do clima; é determinada pela resiliência e resistência do sistema.
- **A Vulnerabilidade Sócio-económica** – que é função de:
 - **Impacto Potencial**, é o equivalente, em termos sócio-económicos, da susceptibilidade natural, mas dependente das acções humanas.
 - **A Capacidade Técnica, Institucional, Económica e Cultural para evitar ou lidar com os impactos das alterações climáticas**, equivale à resiliência e resistência natural, sendo muito influenciada por adaptações tanto autónomas como planeadas.

A propósito da **vulnerabilidade sócio-económica** tem-se a referir a metodologia DPSIR (Driver-Pressure-State-Impact-Response) apresentada por Sonak *et al.* (2002 *in* Noronha *et al.*, 2002), aplicada à região de Goa (Índia) e desenvolvida pela AEA, a qual considera um conjunto de indicadores que se repartem por 4 campos – (1) Social, (2) Económico, (3) Ambiental e (4) Político-Jurídico – a qual tem vindo a ser aplicada a várias situações, com particular incidência no estudo dos impactos associados ao desenvolvimento turístico.

10.1. Metodologias de Análise de Vulnerabilidade às Alterações Climáticas

A Vulnerabilidade Natural dos Sistemas, quando aplicada aos recursos hídricos subterrâneos, deve considerar-se segundo duas componentes: (1) a quantitativa e (2) a qualitativa. A quantitativa está sobretudo relacionada com a alteração dos regimes de precipitação e temperatura, e portanto exclusivamente com os volumes de água que possam constituir recursos hídricos, enquanto que a qualitativa se relaciona com:

- ◆ vulnerabilidade à poluição,
- ◆ vulnerabilidade à subida do mar,
- ◆ vulnerabilidade às modificações de qualidade dos recursos induzidas pelas respostas de adaptação humanas às alterações climáticas,
- ◆ vulnerabilidade às modificações de qualidade dos recursos induzidas em exclusivo por respostas naturais dos sistemas às alterações do clima (ex.: aumento do teor de sais nas águas dos aquíferos, induzido pelo incremento dos processos de capilaridade e evaporação – podem inclusive formar crostas salinas na zona vadosa – causados por subida de temperatura e redução da humidade).

Neste sub-capítulo serão abordadas a vulnerabilidade à subida do nível do mar e a vulnerabilidade às alterações de precipitação e temperatura. No sub-capítulo seguinte será analisada a vulnerabilidade no aspecto qualitativo/vulnerabilidade à poluição.

Os principais métodos de análise da vulnerabilidade às alterações climáticas (as suas descrições mais detalhadas podem encontrar-se nas pgs. 26 a 29) são os seguintes (SURVAS, 2000, Nicholls, 1998):

- Common Guidelines/Common Methodology (Metodologia Comum);
- South Pacific Islands Methodology (Metodologia das Ilhas do Pacífico Sul);
- IPCC Technical Guidelines;
- US Country Studies;
- UNEP Guidelines/Handbook Methodology;
- SURVAS (Synthesis and Upscaling of Sea-Level Rise Vulnerability Assessment Studies);
- Environmental Vulnerability Index;
- Global Vulnerability Assessment;
- Caribbean Disaster Mitigation Project;
- Research Institute for Knowledge Systems Methodology.

Estas metodologias tendem a equacionar sobretudo os problemas de submersão e erosão costeira, alterações dos ecossistemas, impactos económicos e/ou alteração do potencial agrícola, deixando em plano secundário a análise dos efeitos sobre os

aquíferos litorais. Uma metodologia de vulnerabilidade à subida do nível do mar especificamente focada para os problemas da qualidade da água dos aquíferos, a metodologia GALDIT, que adiante se exporá, foi desenvolvida por Chachadi e Lobo Ferreira (2001).

Para a análise da vulnerabilidade dos sistemas aquíferos das ilha Terceira às alterações climáticas optou-se por escolher a metodologia GALDIT no aspecto vulnerabilidade à subida do nível do mar. Para a vulnerabilidade dos aquíferos às alterações climáticas no aspecto alterações dos regimes de precipitação e temperatura, preferiu-se desenvolver uma metodologia nova, dado que a maioria das metodologias actualmente existentes se centram sobretudo na questão dos impactos das alterações do nível do mar sobre as regiões costeiras no seu todo, não sendo especificamente vocacionados para a análise dos impactos das alterações climáticas sobre os aquíferos, sobretudo no que se refere às alterações nos regimes de precipitação e temperaturas.

10.1.1. METODOLOGIAS DE VULNERABILIDADE À SUBIDA DO NÍVEL DO MAR/INTRUSÃO SALINA

Como se referiu acima e no Capítulo 7 as alterações climáticas podem ser responsáveis por um conjunto de acções sobre a qualidade das águas, centrando-se os maiores efeitos na intrusão salina, a qual é sobretudo potenciada pela subida do nível do mar. A amplitude da intrusão salina depende contudo das propriedades intrínsecas dos materiais aquíferos.

Porém, além da intrusão salina, e para uma compreensão completa do processo, deveriam considerar-se também os impactos que as alterações climáticas poderão ter na preservação/degradação dos solos e coberto vegetal, numa mudança dos regimes de evapotranspiração e assim nos mecanismos de salinização da zona não saturada e potencial passagem destes sais à zona aquífera⁹⁴, assim como nas potenciais alterações no stress hídrico sobre os aquíferos (ex.: se incrementarem os consumos, os níveis piezométricos podem rebaixar significativamente, favorecendo o avanço da cunha salina) que podem afectar esta mesma vulnerabilidade. Não é assim de surpreender que um dos índices de vulnerabilidade às alterações climáticas – o **Environmental Vulnerability Index** (EVI) desenvolvido por SOPAC (Kaly *et al.*, 1999 a e b) – considere como uma das classes de indicadores precisamente o aspecto de degradação ambiental, onde se inclui a qualidade das águas.

As características específicas dos sistemas insulares como (1) a juventude da maior parte das respectivas litologias (o que influi na circulação e funcionamento dos aquíferos, nos mecanismos de degradação dos poluentes, os quais estão também dependentes da velocidade de circulação, etc.), (2) a reduzida dimensão da maior parte dos aquíferos e/ou a rápida circulação das águas, (3) a ligação hidráulica entre aquíferos, levando a que aquíferos profundos acabem de algum modo por estar ligados à superfície (e estar assim sujeitos a serem atingidos por poluição localizada inicialmente

⁹⁴ Um outro aspecto que a modificação da vegetação poderá acarretar é a alteração nos volumes de água disponíveis para recarga, o que, caso se trate de um aquífero costeiro, pode ter alguma influência na evolução da intrusão salina.

à superfície), (4) praticamente todos os aquíferos, mesmo os não superficiais, terem áreas em que funcionam como aquíferos livres dada a topografia dos maciços em que se inserem, (5) a influência da vegetação nos processos de recarga (a precipitação oculta é apenas uma destas facetas), (6) o impacto da actividade sismo-vulcânica nos percursos de circulação e na alteração dos regimes de infiltração e (7) o comportamento das cunhas salinas que afectam os aquíferos de base, são aspectos que controlam o seu comportamento à vulnerabilidade à alteração da qualidade das águas.

Na verdade os corpos insulares são marcados por um comportamento hidrogeológico muito heterogéneo dada a diversidade de (1) litologias, (2) disposição geométrica, (3) heterogeneidades internas dos materiais (ex.: zonas de escórias e zonas de lavas compactas numa mesma escoada lávica; gradação granulométrica num mesmo manto piroclástico), (4) complexidade estrutural, (5) rede de fracturação, (6) reduzida dimensão da maioria das unidades produtivas, (6) ligações hidráulicas entre unidades produtivas, (7) no geral curtos tempos de permanência das águas e forte influência da vegetação nos processos de recarga, sobretudo em ilhas de reduzida dimensão onde a precipitação por vezes pode desviar-se para o oceano (ex.: Corvo), (8) impacto da actividade sísmica e vulcânica ao criar percursos preferenciais de circulação, influenciar o quimismo das águas, etc., (9) acção das marés e interface com a água salgada nos aquíferos de base, (10) influência da topografia não apenas na recarga mas na exposição à superfície de algumas regiões de aquíferos de outro modo potencialmente confinados⁹⁵.

Como neste capítulo se pretende apenas analisar os impactos da alteração do nível do mar sobre a intrusão salina pode desprezar-se praticamente todos estes aspectos da complexidade hidrogeológica característica das ilhas vulcânicas e centrar as atenções apenas na região costeira. Deve referir-se que, para uma correcta avaliação destes impactos, tem de se levar em consideração as complexidades hidrogeológicas que possam ocorrer nesta faixa costeira, dado estas poderem controlar fortemente a evolução da intrusão salina. Porém, sendo ainda reduzido o conhecimento detalhado, local a local, do controle estrutural sobre o funcionamento hidráulico dos aquíferos costeiros na ilha Terceira, necessário para um estudo pormenorizado destes impactos (fundamental por exemplo para a modelação matemática da evolução da intrusão salina, em diferentes cenários de subida do nível do mar/alterações climáticas) optou-se por simplificar o problema considerando zonas de homogeneidade comportamental, com permeabilidade representativa média, abordagem que tem sido realizada por várias vezes no estudo de maciços fracturados.

A vulnerabilidade à intrusão salina pode definir-se como a “**sensibilidade da qualidade da água subterrânea a uma extracção imposta ou à subida do nível do mar, ou a ambas na faixa costeira, o que é determinado pelas características intrínsecas do aquífero**” (Lobo Ferreira *et al.*, 2005). Esta definição tem algum parentesco com a definição de **vulnerabilidade à poluição de aquíferos** (a *sensibilidade da qualidade das águas subterrâneas a uma carga poluente, função apenas das características intrínsecas do aquífero e do tipo de poluente*) de Lobo Ferreira e Cabral (1991). E de facto a metodologia GALDIT refere-se a um aspecto específico de vulnerabilidade que

⁹⁵ E que se tornam assim potenciais pontos de entrada de contaminantes no aquífero.

se pode enquadrar dentro do campo mais vasto das metodologias de vulnerabilidade à poluição/alteração da qualidade das águas subterrâneas.

O método GALDIT foi desenvolvido no âmbito do projecto COASTIN por Chachadi e Lobo Ferreira (2001) para as regiões costeiras de clima tropical da Índia, com objectivo de avaliar a vulnerabilidade (ou potencial para) à intrusão salina. O método foi criado tendo em conta não apenas as condições específicas do litoral indiano mas incorporando aspectos universais do funcionamento dos aquíferos costeiros, por forma a poder ser aplicado a qualquer região costeira. Posteriormente foi modificado e é a nova versão de Chachadi e Lobo Ferreira (2005) que é utilizada neste estudo e abaixo se descreve.

Tal como noutras metodologias de determinação da vulnerabilidade, a avaliação da vulnerabilidade de uma região costeira à intrusão salina é realizada por meio de um somatório ponderado de 6 parâmetros, que são os seguintes:

- G – Ocorrência de aquíferos
- A – Condutividade hidráulica
- L – Profundidade ao nível de água acima do nível do mar
- D – Distância à linha de costa
- I – Impacto do estado actual da intrusão salina na região
- T – Espessura do aquífero

Esta metodologia, na sua nova versão, permite a adição ou remoção de um ou mais dos indicadores acima enunciados, pois nalgumas zonas costeiras alguns dos parâmetros simplesmente não se verificam, e o objectivo é que este seja um método geral, aplicado a todas as condições costeiras.

Os valores dos parâmetros variam entre 2,5 e 10, onde 2,5 corresponde a baixa vulnerabilidade e 10 a alta. Estes valores são no geral atribuídos a partir de tabelas que fazem a correspondência entre as características hidrogeológicas locais e o valor do parâmetro associado. Os coeficientes de ponderação atribuídos a cada parâmetro variam entre 1 e 4, onde 1 é o coeficiente de ponderação associado ao(s) parâmetro(s) com menor influência na vulnerabilidade e 4 é o coeficiente de ponderação associado ao(s) parâmetro(s) com maior influência na vulnerabilidade, sendo a sua atribuição (Quadro LXXVIII):

Quadro LXXVIII – Parâmetros GALDIT

Parâmetro GALDIT	Valor do Coeficiente de Ponderação
G – Ocorrência de aquíferos	1
A – Condutividade hidráulica	3
L – Profundidade ao nível de água acima do nível do mar	4
D – Distância à linha de costa	4
I – Impacto do estado actual da intrusão salina na região	1
T – Espessura do aquífero	2

Conhecidos os valores dos parâmetros e respectivos coeficientes de ponderação, o índice de vulnerabilidade GALDIT é calculado segundo a expressão (Chachadi *et al.*, 2003), no caso de utilização de todos os parâmetros:

$$\text{Eq. 6: } \text{GALDIT} = (1 \times G + 3 \times A + 4 \times L + 4 \times D + 1 \times I + 2 \times T)/15$$

No caso genérico (uso de todos ou parte dos parâmetros), o seu cálculo é dado por:

$$\text{Eq. 7: } \text{GALDIT} = \frac{\sum_{i=1}^6 [(W_i)R_i]}{\sum_{i=1}^6 W_i}$$

O valor máximo do Índice GALDIT é 10, sendo calculado usando na fórmula os valores máximos de todos os parâmetros:

$$\text{Eq. 8: } \text{GALDIT} = (1 \times 10 + 3 \times 10 + 4 \times 10 + 4 \times 10 + 1 \times 10 + 2 \times 10)/15$$

Enquanto que o valor mínimo é 2,5, calculado usando na fórmula os valores mínimos de todos os parâmetros é:

$$\text{Eq. 9: } \text{GALDIT} = (1 \times 2,5 + 3 \times 2,5 + 4 \times 2,5 + 4 \times 2,5 + 1 \times 2,5 + 2 \times 2,5)/15$$

As classes finais de vulnerabilidade GALDIT, definidas em função do valor do *índice GALDIT* calculado pela fórmula acima são as seguintes (Quadro LXXIX):

Quadro LXXIX – Classes GALDIT

Classe de Vulnerabilidade	Índice GALDIT
Muito vulnerável	> 7,5
Moderadamente vulnerável	5 a 7,5
Não vulnerável	< 5

Segue-se a descrição dos parâmetros deste método:

1. **parâmetro G – Ocorrência de Aquíferos**, refere-se ao tipo de aquífero, sendo considerados os seguintes tipos: (1) confinados, (2) livres, (3) semi-confinados, (4) delimitado. O valor do parâmetro para cada um destes tipos de aquíferos é (Quadro LXXX):

Quadro LXXX – Parâmetro G: Ocorrência de Aquíferos

Classe de Ocorrência de Aquífero	Valor do Índice Tipo
Confinado	10
Livre	7,5
Semi-Confinado	5
Delimitado (recarga e/ou fronteira impermeável alinhada paralelamente à costa)	2,5

Os autores consideram que em condições naturais (não exploração) os aquíferos livres são mais susceptíveis que os aquíferos confinados porque não possuem a protecção dada por uma carga hidráulica superior à pressão atmosférica que é tipicamente encontrada nos aquíferos confinados; porém quando há exploração o aquífero confinado torna-se de todos o mais vulnerável, devido à formação de um maior cone de rebaixamento e descarga instantânea de água para as captações durante a bombagem. Os aquíferos semi-confinados são menos susceptíveis dado não só possuírem uma carga hidráulica superior à que existiria num aquífero livre mas porque podem manter ao longo do tempo pelo menos uma parte dessa carga via drenância a partir dos aquíferos circundantes. Os aquíferos separados do mar por uma barreira impermeável são de longe os mais protegidos da intrusão salina, logo os menos vulneráveis. Deste modo os autores consideraram que em termos gerais os aquíferos confinados são os mais vulneráveis, os livres têm um comportamento intermédio e os “delimitados” os menos vulneráveis. Chachadi e Lobo Ferreira (2001) aconselham igualmente que no caso de sistemas multi-aquíferos se pode adoptar o valor mais elevado do conjunto atribuído a cada um dos aquíferos individualmente.

2. **parâmetro A – Condutividade Hidráulica**, é tal como nos outros métodos, uma medição da velocidade de fluxo da água no aquífero para o mar e depende da fracturação e porosidade eficaz. Existe uma relação entre a dimensão da intrusão salina e o fluxo de água doce para o mar; quanto maior a condutividade hidráulica, maior este fluxo a portanto a susceptibilidade ao avanço do intrusão salina. A intrusão salina tende a ser máxima nos períodos de estio, quando não há recarga, e também nas regiões de sobreexploração, dado que o rebaixamento do nível de água doce promove o avanço da água do mar para o continente. As diferentes classes e valores deste parâmetro são modificados da metodologia DRASTIC (Aller *et al.*, 1987), podendo ser assim resumidos (Quadro LXXXI):

Quadro LXXXI – Parâmetro A: Condutividade Hidráulica

Condutividade Hidráulica		Valor do Índice
Classe	Intervalo (m/d)	
Alta	> 40	10
Média	10 – 40	7,5
Baixa	5 – 10	5
Muito baixa	< 5	2,5

3. **parâmetro L – Altura do Nível de Água Acima do Nível do Mar**, refere-se ao nível de água medido em relação ao nível médio do mar, e este é um parâmetro muito importante dado que determina a carga hidráulica que detêm ou faz mesmo recuar o avanço da interface água doce/água salgada. Neste parâmetro devem ser consideradas apenas as variações temporais de longo período dos níveis de água. As diferentes classes e respectivos valores deste parâmetro são os seguintes (Quadro LXXXII):

Quadro LXXXII – Parâmetro L: Altura do Nível de Água Acima do Nível do Mar

Altura do Nível de Água Acima do Nível do Mar		Valor do Índice
Classe	Intervalo (m)	
Alta	< 1	10
Média	1 – 1,5	7,5
Baixa	1,5 – 2	5
Muito baixa	> 2	2,5

4. **parâmetro D – Distância à Linha de Costa** o impacto da intrusão salina no geral diminui com o aumento da distância na perpendicular à linha de costa, sendo máxima junto da linha litoral. Os valores possíveis deste parâmetro são (Quadro LXXXIII):

Quadro LXXXIII – Parâmetro D: Distância à Linha de Costa

Distância à Linha de Costa/Maré Alta		Valor do Índice
Classe	Intervalo (m)	
Muito perto	< 500	10
Perto	500 – 750	7,5
Meia distância	750 – 1 000	5
Longe	> 1 000	2,5

5. **parâmetro I – Impacto do Estado Actual da Intrusão Salina na Região**, considera o stress que existe na região devido à extracção de água; reflecte o desequilíbrio que pode existir entre a água do mar e a água doce por alteração do equilíbrio hidráulico em condições naturais, devido à pressão antrópica já registada na zona de estudo. Se os dados hidroquímicos não existem pode usar-se a informação colhida no campo ou dos próprios consumidores da água. Os valores possíveis deste parâmetro são (Quadro LXXXIV):

Quadro LXXXIV – Parâmetro I: Impacto do Estado Actual da Intrusão Salina

Impacto do Estado Actual da Intrusão Salina		Valor do Índice baseado na relação $Cl/(HCO_3 + CO_3)$ na água doce
Classe	Relação $Cl/(HCO_3 + CO_3)$ em epm na água doce	
Alta	> 2	10
Média	1,5 – 2	7,5
Baixa	1 – 1,5	5
Muito baixa	< 1	2,5

6. **parâmetro T – Espessura do Aquífero**, refere-se à espessura saturada do aquífero, a qual tem um importante papel no controle da extensão da intrusão salina. Num aquífero livre a extensão da intrusão salina (Bear e Verruijt, 1987) em condição de ausência de recarga é dada pela expressão:

$$\text{Eq. 10: } L_c = K \times B^2 / (2 \times q \times 0,0257)$$

Onde:

L_c = comprimento da interface com a água do mar (indica a extensão da intrusão salina)

K = condutividade hidráulica do aquífero

B = espessura do aquífero

q = caudal de água doce descarregado no mar

Portanto, quanto maior for a espessura do aquífero maior a extensão da intrusão. Assim, os valores possíveis deste parâmetro são (Quadro LXXXV):

Quadro LXXXV – Parâmetro T: Espessura do Aquífero

Espessura Saturada do Aquífero		Valor do Índice
Classe	Intervalo (m)	
Grande	> 10	10
Média	7,5 – 10	7,5
Pequena	5 – 7,5	5
Muito pequena	< 5	2,5

10.1.2. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA GALDIT NA ILHA TERCEIRA PARA OS CENÁRIOS DE ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS

Esta metodologia não se aplicou ao sistema aquífero Serra do Cume por ser um aquífero sem contacto directo com o mar e, dada a sua localização, se admite que não venha a estar em contacto, mesmo nos cenários de alteração do nível do mar mais desfavoráveis. Assim sendo, não se considera que venha a sofrer impactos devidos à subida do nível do mar, estando portanto fora do âmbito da aplicação da metodologia GALDIT; a área deste sistema aquífero é atribuída ao sistema subjacente, que se considerou ser o de Guilherme Moniz-S. Sebastião, por as suas características o tornarem mais vulnerável que o sistema aquífero Graben. Todos os restantes aquíferos da ilha Terceira têm regiões de contacto com o mar, sendo a metodologia GALDIT aplicada às respectivas faixas costeiras. Embora a metodologia GALDIT devesse ser aplicada considerando as propriedades hidráulicas e características das faixas costeiras, visto tal caracterização ser bastante deficiente, optou-se por utilizar as propriedades médias do sistema aquífero, tal como apresentados no Plano Regional da Água (DROTRH e IA, 2001). No caso do sistema aquífero Santa Bárbara Superior, consideraram-se apenas as duas escoadas que se encontram em contacto directo com o mar; as escoadas sem contacto com o mar foram consideradas como pertencentes a Santa Bárbara Inferior, dado serem estes os terrenos que lhe estão subjacentes.

Admitiu-se que, dada a estrutura das formações e a localização dos pontos de água na faixa litoral (tipicamente poços de maré ou furos superficiais), os aquíferos nesta faixa são todos livres. Decidiu-se tratar como excepção o sistema aquífero Graben, dado que em paralelo com níveis produtivos mais superficiais livres, ocorrem aquíferos confinados; na impossibilidade, por escassez de dados, de delimitar as zonas livres e confinadas deste sistema, optou-se por considerar a situação mais desfavorável, ou seja, o caso de aquífero confinado. Quanto à condutividade adoptou-se a informação disponível no Plano Regional da Água e que se apresenta no Quadro XXXVI. A altura do nível de água acima do mar, estado irregularmente caracterizada ao longo dos vários sistemas aquíferos da ilha em contacto com o mar, e sendo dependente da condutividade das formações, foi considerada em função da permeabilidade dos sistemas aquíferos; como os valores de condutividade hidráulica conhecidos para a ilha Terceira têm valores muito elevados mas num amplo espectro de amplitudes e o nível de água acima do nível do mar, em condições de não exploração, pode estar directamente relacionado com a permeabilidade, optou-se por um valor mínimo de 1 m para as formações mais permeáveis (valores acima de 150 m/d), entre 1 a 1,5 para as permeabilidades entre 100 a 150, e entre 1,5 a 2 m para permeabilidades inferiores. A distância à linha de costa foi considerada até além de 1 000 m, pois embora os pontos de água do aquífero basal se situem na sua maioria a menos de 750 m do litoral, e frequentemente (nascentes e poços de maré) a menos de 500 m, o facto de se poderem explorar regiões do aquífero basal muito mais para o interior (ex.: depressão das Lajes ou dos Cinco Picos) leva a que se devam considerar também distâncias à linha de costa superiores às da média dos pontos de água actuais. O impacto do estado actual da intrusão salina é mal conhecido, sendo praticamente desconhecida a sua caracterização hidroquímica, pelo que se optou por considerar os sistemas com reduzido ou nulo número de furos de bombagem como “sem intrusão salina”, ao passo que os aquíferos mais explorados (Guilherme Moniz, Graben, Ignimbritos das Lajes) por furos de bombagem como “tendo intrusão salina”; fez-se nestes aquíferos uma gradação da intrusão salina em função da permeabilidade e número de furos na faixa litoral. A espessura saturada do aquífero é outro parâmetro mal conhecido na faixa litoral, no que se refere à globalidade da ilha, embora existam regiões melhor caracterizadas e onde esta espessura possa ser aproximadamente definida embora, dada a heterogeneidade das formações, este parâmetro possa ser altamente variável de local para local; na ausência de dados significativos que permitam a sua definição pormenorizada, e considerando as espessuras médias mais prováveis dos níveis produtivos encontrados na Terceira, optou-se por considerar espessuras de até 10 m para os sistemas de Guilherme Moniz, Graben, Ignimbritos das Lajes, Terra Chã-Biscoitos; para os aquíferos de Ribeirinha, Serra de Santiago, Central e Lapaçal-Quatro Ribeiras e Santa Bárbara Inferior optou-se por espessuras de 5 a 7,5 m; para o sistema de Santa Bárbara Superior, dado corresponder a pequenas escoadas de reduzida espessura, optou-se por considerar espessuras abaixo de 5 m⁹⁶. Os resultados da aplicação do método GALDIT aos aquíferos da ilha Terceira encontram-se no Quadro LXXXVI.

⁹⁶ Estes valores são um compromisso entre o que se conhece da espessura saturada dos aquíferos, a espessura destes e a sua permeabilidade.

Quadro LXXXVI – Resultados da Metodologia GALDIT para a Ilha Terceira

Sistemas Aquíferos	G	A	L	D	I	T	Índice	Classe de Vulnerabilidade
Caldeira Guilherme Moniz-São Sebastião	1 x 7,5	3 x 10	4 x 10	4 x 10	1 x 10	2 x 7,5	9,50	Muito vulnerável
				4 x 7,5			8,83	Muito vulnerável
				4 x 5			8,17	Muito vulnerável
				4 x 2,5			7,50	Moder. vulnerável
Ribeirinha	1 x 7,5	3 x 7,5	4 x 5	4 x 10	1 x 2,5	2 x 5	6,83	Moder. vulnerável
				4 x 7,5			6,17	Moder. vulnerável
				4 x 5			5,50	Moder. vulnerável
				4 x 2,5			4,83	Baixa vulnerável
Graben	1 x 10	3 x 10	4 x 5	4 x 10	1 x 7,5	2 x 7,5	8,17	Muito vulnerável
				4 x 7,5			7,50	Moder. vulnerável
				4 x 5			6,83	Moder. vulnerável
				4 x 2,5			6,17	Moder. vulnerável
Ignimbritos das Lajes	1 x 7,5	3 x 10	4 x 7,5	4 x 10	1 x 10	2 x 7,5	8,83	Muito vulnerável
				4 x 7,5			8,17	Muito vulnerável
				4 x 5			7,50	Moder. vulnerável
				4 x 2,5			6,83	Moder. vulnerável
Serra de Santiago	1 x 7,5	3 x 7,5	4 x 5	4 x 10	1 x 2,5	2 x 5	6,83	Moder. vulnerável
				4 x 7,5			6,17	Moder. vulnerável
				4 x 5			5,50	Moder. vulnerável
				4 x 2,5			4,83	Baixa vulnerável
Central	1 x 7,5	3 x 7,5	4 x 5	4 x 10	1 x 5	2 x 5	7,00	Moder. vulnerável
				4 x 7,5			6,33	Moder. vulnerável
				4 x 5			5,67	Moder. vulnerável
				4 x 2,5			5,00	Moder. vulnerável
Labaçal-Quatro Ribeiras	1 x 7,5	3 x 10	4 x 5	4 x 10	1 x 7,5	2 x 5	7,67	Muito vulnerável
				4 x 7,5			7,00	Moder. vulnerável
				4 x 5			6,33	Moder. vulnerável
				4 x 2,5			5,67	Moder. vulnerável
Biscoitos-Terra Chã	1 x 7,5	3 x 10	4 x 7,5	4 x 10	1 x 2,5	2 x 7,5	8,33	Muito vulnerável
				4 x 7,5			7,67	Muito vulnerável
				4 x 5			7,00	Moder. vulnerável
				4 x 2,5			6,33	Moder. vulnerável
Santa Bárbara Superior	1 x 7,5	3 x 10	4 x 7,5	4 x 10	1 x 2,5	2 x 2,5	7,67	Muito vulnerável
				4 x 7,5			7,00	Moder. vulnerável
				4 x 5			6,33	Moder. vulnerável
				4 x 2,5			5,67	Moder. vulnerável
Santa Bárbara Inferior	1 x 7,5	3 x 7,5	4 x 5	4 x 10	1 x 2,5	2 x 5	6,83	Moder. vulnerável
				4 x 7,5			6,17	Moder. vulnerável
				4 x 5			5,50	Moder. vulnerável
				4 x 2,5			4,83	Baixa vulnerável

Deste quadro verifica-se que os aquíferos muito vulneráveis às alterações do nível do mar são:

- *Caldeira de Guilherme Moniz-S. Sebastião* – muito vulneráveis até 1 km de distância à costa, tornando-se moderadamente vulneráveis mais para o interior, embora no limiar para a situação de muito vulnerável.
- *Ignimbritos das Lajes, Biscoitos-Terra Chã* – muito vulneráveis até 750 m de distância à costa; tornam-se moderadamente vulneráveis mais para o interior; de referir que no caso do sistema Ignimbrito das Lajes, entre os 750 e os 1 000 de distância à costa o aquífero está no limiar para muito vulnerável.
- *Santa Bárbara Superior, Labaçal-Quatro Ribeiras, Graben* – muito vulneráveis até 500 m de distância à costa; acima dessa distância tornam-se

moderadamente vulneráveis, sendo o sistema Graben o mais vulnerável dos três; de notar que no caso do sistema Graben entre os 500 e os 750 m de distância à costa se está no limiar para muito vulnerável.

- *Central* – moderadamente vulnerável até mais de 1 000 m de distância à costa.
- *Santa Bárbara Inferior, Serra de Santiago e Ribeirinha* – moderadamente vulneráveis até 1 000 de distância à costa, tornando-se de baixa vulnerabilidade mais para o interior.

De sublinhar que esta classificação poderá vir a ser alterada à medida que um melhor conhecimento do funcionamento e propriedades hidráulicas destes aquíferos, na faixa costeira, for sendo alcançado.

A distribuição espacial dos parâmetros da metodologia GALDIT para a ilha Terceira é apresentada nas Figs. 65 a 70. O zonamento da vulnerabilidade dos aquíferos às alterações do nível do mar, de acordo com a metodologia GALDIT, para a ilha Terceira, é apresentado na Fig. 71:

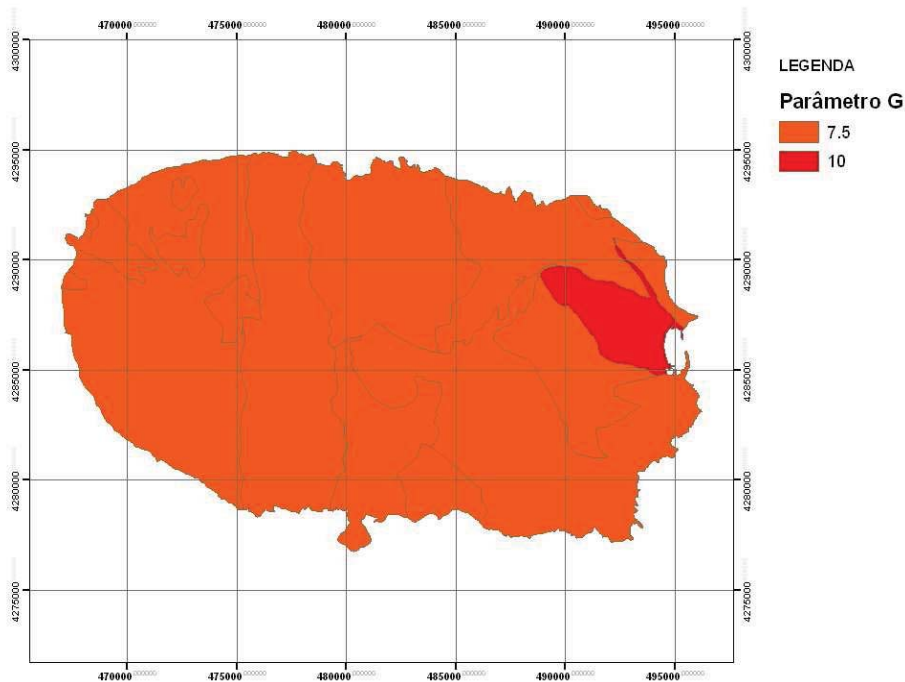


Figura 65 – Metodologia GALDIT para a ilha Terceira: Parâmetro G

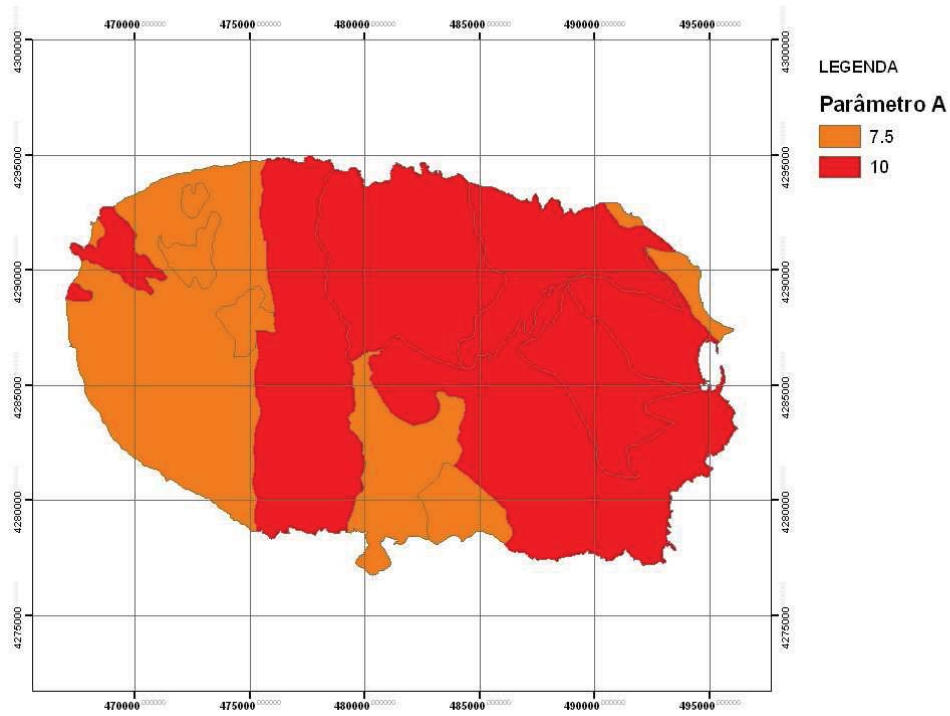


Figura 66 – Metodologia GALDIT para a ilha Terceira: Parâmetro A

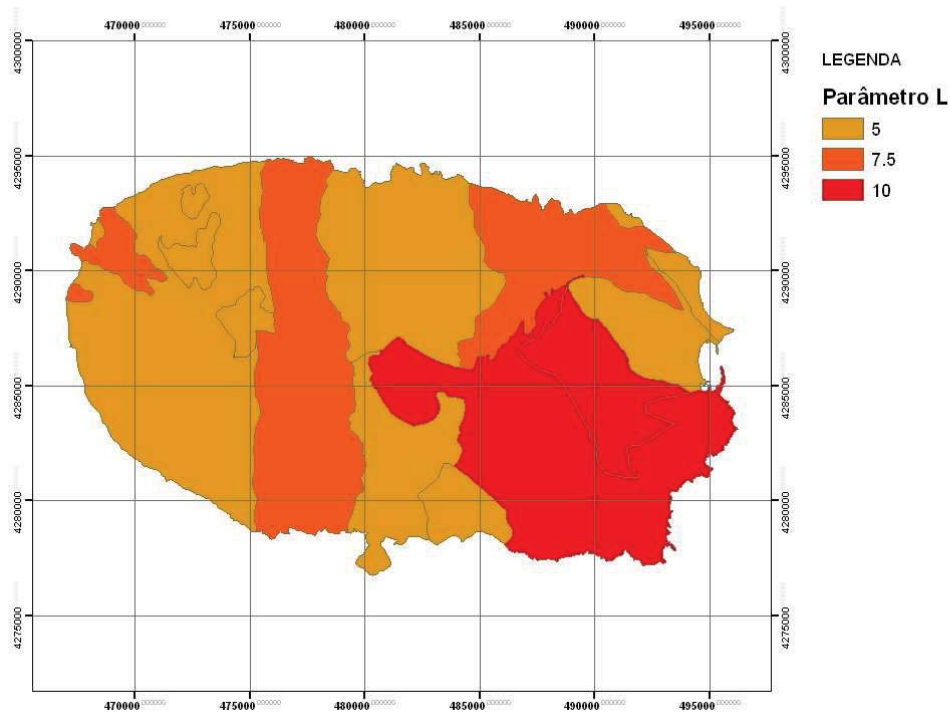


Figura 67 – Metodologia GALDIT para a ilha Terceira: Parâmetro L

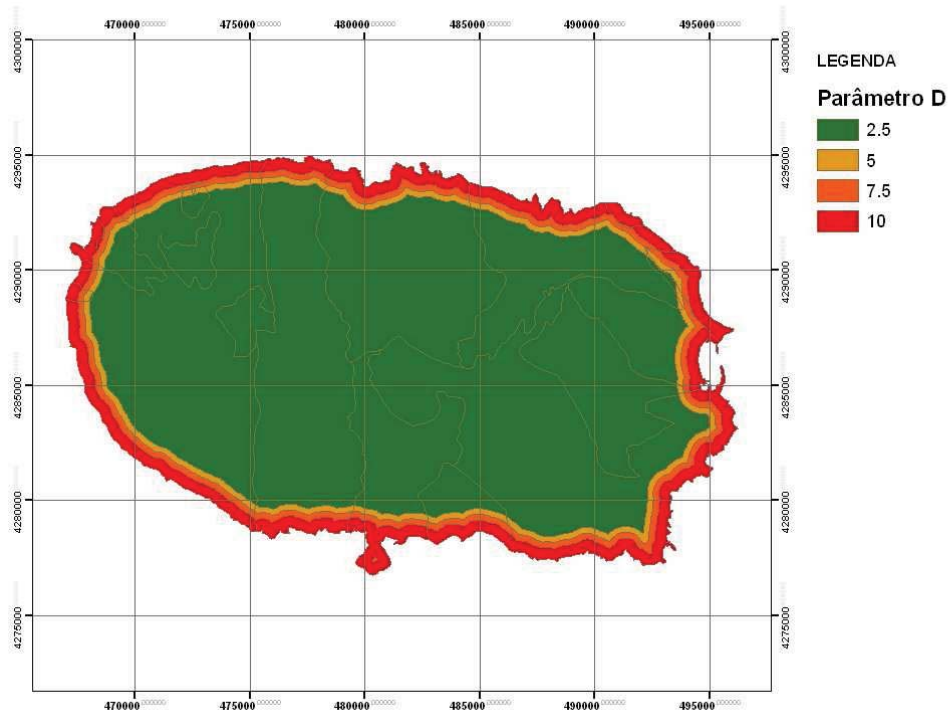


Figura 68 – Metodologia GALDIT para a ilha Terceira: Parâmetro D

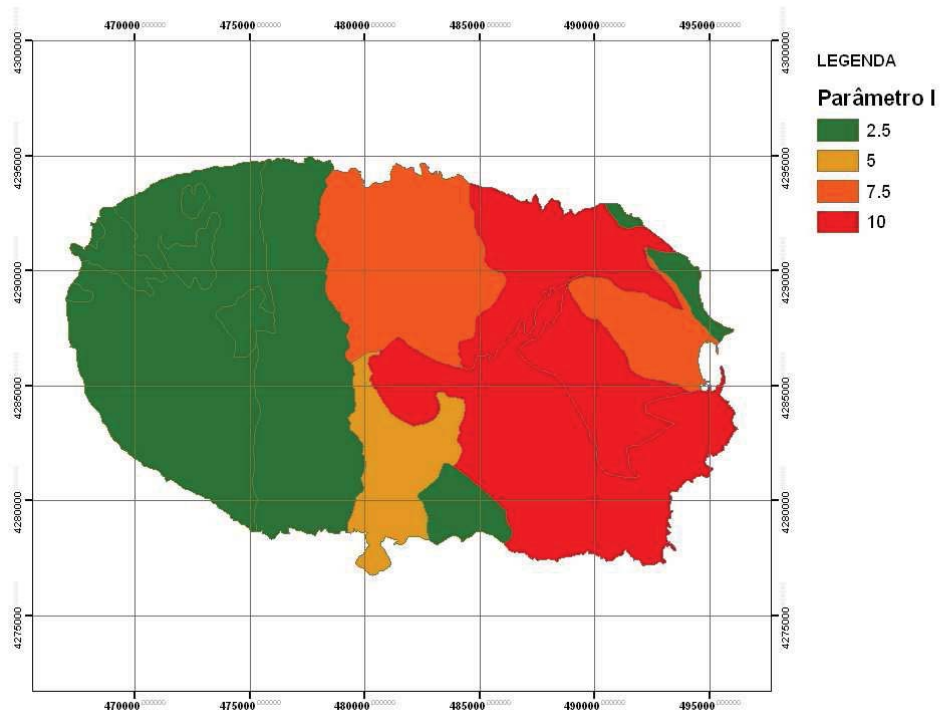


Figura 69 – Metodologia GALDIT para a ilha Terceira: Parâmetro I

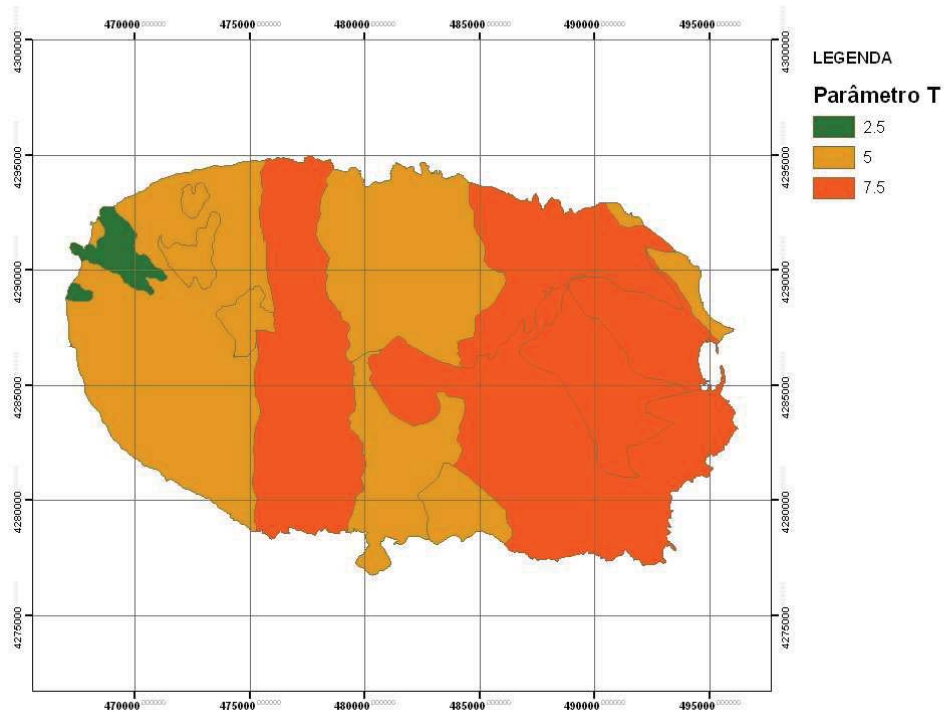


Figura 70 – Metodologia GALDIT para a ilha Terceira: Parâmetro T

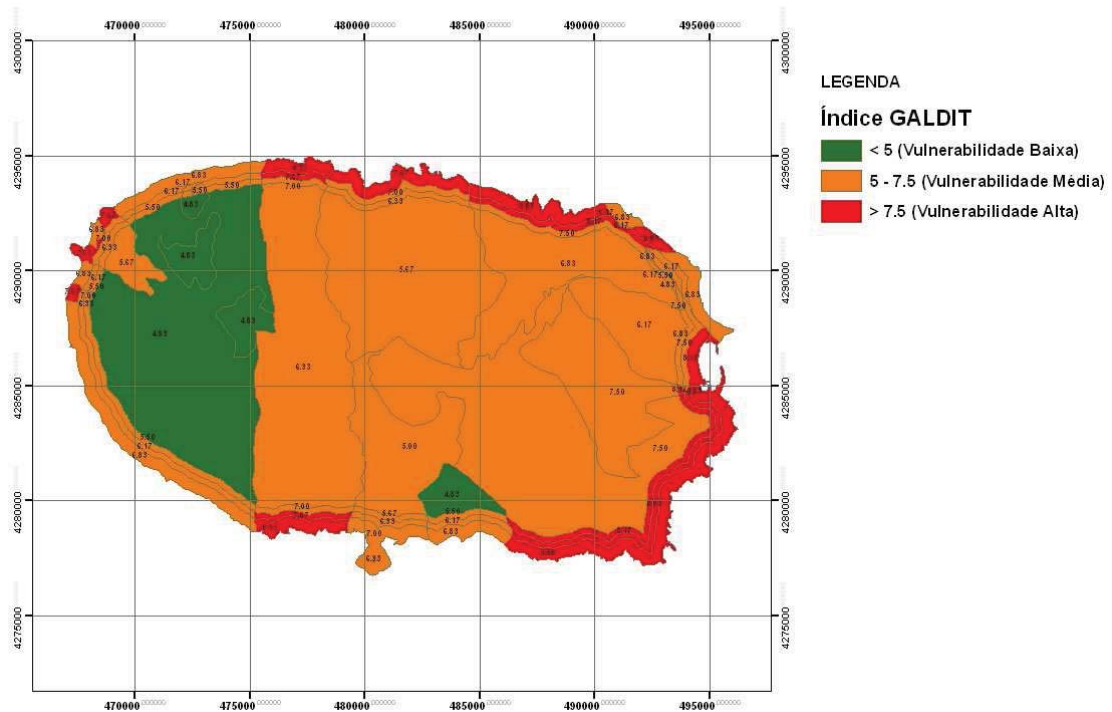


Figura 71 – Metodologia GALDIT para a ilha Terceira: zonamento da vulnerabilidade dos aquíferos à subida do nível do mar (Índice GALDIT)

10.2. Metodologia de Análise da Vulnerabilidade dos Sistemas Aquíferos às Alterações Climáticas

Os factores mais afectáveis pelas alterações climáticas e cujas alterações afectam os recursos hídricos subterrâneos, fundamentais para a estrutura de uma metodologia de classificação da vulnerabilidade de aquíferos às alterações climáticas, são:

1. De Origem Natural – estes factores correspondem a propriedades e características intrínsecas do meio físico, susceptíveis de serem afectadas pelas alterações climáticas. Os factores identificados neste estudo são:

- *Recarga* – dada a sua forte dependência dos regimes de precipitação, as alterações climáticas têm um forte impacto sobre este aspecto, como aliás os resultados obtidos nesta dissertação para cenários teóricos o demonstraram (vide Novo, 2003).
- *Susceptibilidade à estiagem* – define a capacidade do aquífero suportar condições de estiagem. As alterações no clima provocam uma modificação no padrão destes períodos de escassez e assim no impacto destas condições modificadas sobre o aquífero⁹⁷.
- *Localização do aquífero/Contacto com o mar* – indica se aquíferos actualmente sitos acima do mar podem vir a entrar em contacto com este em caso de subida do nível do mar; é um factor que tem que ver não só com a altitude da base do aquífero mas também com a existência de corredores hidrogeológicos que permitam fácil acesso da água do mar aos aquíferos em causa. É um factor que apenas terá significado, e importante, para as ilhas de topografia baixa, como por exemplo as de atol.
- *Proximidade ao mar medida na horizontal* – este factor é afectado pelas alterações da linha de costa (via subida do nível do mar e erosão do litoral induzida por esta subida). Perante um recuo da linha de costa os aquíferos de base/costeiros ficam sujeitos aos efeitos do avanço associado da cunha salina.
- *Recarga a partir de lagoas* – se se der uma alteração significativa nos regimes de precipitação e aporte de água às lagoas e estas estiverem em ligação hidráulica com aquíferos, não só a quantidade disponível para recarga a partir destas será alterada mas também ocorrerão alterações na eventual concentração de poluentes; esta carga poluente modificada poderá então alcançar os aquíferos recarregados pelas lagoas.
- *Ligação hidráulica com aquíferos superiores* – se ocorrer uma alteração dos volumes de recarga nos aquíferos superiores, por via das alterações climáticas, o equilíbrio hidráulico entre os vários aquíferos em contacto por drenância (ou por “corredores hidráulicos” como fracturas) poderá ser modificado e, deste modo, também os volumes de água que por drenância atingem os aquíferos subjacentes.
- *Dimensão da espessura de água do aquífero de base* – este factor pode modificar-se por alteração tanto da recarga directa como da recarga por drenância a partir dos aquíferos suprajacentes, modificando o nível de água

⁹⁷ Por exemplo, em casos extremos de aridez e pequena dimensão dos aquíferos podem vir a criar-se condições para o esgotamento total destes, os quais deixam então de ser sequer um recurso.

no aquífero de base e assim a susceptibilidade ao avanço da cunha salina e às dimensões da zona de mistura.

2. De Origem Antrópica – estes factores são originados e controlados por acção humana, reflectindo a resposta humana às alterações climáticas. Os factores identificados neste trabalho são:

- *Actividades económicas dominantes* – os vários tipos de actividades económicas têm diferentes impactos na qualidade e quantidade dos recursos hídricos. As alterações climáticas podem promover uma modificação do tipo e/ou importância das várias actividades económicas (ex.: o abandono de certas práticas agrícolas porque incompatíveis com a nova situação climática), alterando assim o seu impacto sobre a quantidade e qualidade dos recursos hídricos. A avaliação destes impactos exige o estudo de cenários de adaptação/mitigação onde sejam identificadas quais actividades económicas serão beneficiadas e quais as que serão prejudicadas pelas alterações climáticas.
- *Consumos* – a alteração das actividades económicas gera alterações nos consumos e portanto no stress sobre os recursos hídricos. As mesmas actividades económicas podem ainda responder com uma modificação dos consumos para responder às alterações climáticas (ex.: um aumento dos consumos domésticos ou agrícolas para fazer face a um aquecimento do clima). A avaliação destes impactos exige que nos cenários acima referidos sejam projectadas evoluções de consumos com a evolução sócio-económica associada às alterações climáticas.
- *Cargas Poluentes* – a modificação das actividades económicas e dos consumos associados irá também causar uma modificação nas cargas poluentes que podem alcançar os aquíferos. A avaliação destes impactos exige que nos cenários acima referidos sejam projectadas evoluções das cargas poluentes com a evolução sócio-económica (e tecnológica) associada às alterações climáticas.

3. De Origem Mista – estes são factores caracterizadores do meio físico mas que podem ser mais ou menos profundamente afectados pelas actividades humanas. Os factores identificados são:

- *Coberto vegetal/ocupação do solo* – este factor pode ser alterado tanto por uma resposta natural da vegetação às novas condições climáticas (com a substituição de espécies por outras mais adaptadas às novas condições) como por acção humana, por exemplo ao mudar os tipos de culturas agrícolas como resposta à alteração do clima.
- *Profundidade ao nível de água* – pode ser influenciado tanto por modificações nos valores de recarga e/ou drenância assim como pela alteração dos consumos.
- *Topografia/Escoamento superficial* – este factor analisa o impacto da topografia no escoamento superficial e assim nas condições de erosão. A topografia pode ser alterada por um incremento natural do escoamento superficial e da erosão associada, por simples modificação das condições climáticas mas pode também ser fortemente modificada pela actividade humana (por exemplo como estratégia para lidar com o aumento da

frequência das enxurradas e eventos de grande erosão desencadeados pelas alterações climáticas). A alteração da topografia afecta o escoamento superficial (e a quantidade de água que pode ser encaminhada para a recarga), assim como o transporte de poluentes, podendo também – nos casos de eventos erosivos provocados por escoamentos superficiais intensos, e consequente sedimentação em zonas baixas – provocar a colmatação por finos (nas zonas de deposição destas cargas sólidas) e assim modificar as condições de infiltração nestas zonas restritas. Em termos de escala temporal a alteração da topografia decorre, na maior parte dos casos, a uma escala mais alargada se o processo for exclusivamente natural; pode ser extremamente rápida se resultar de actividade antrópica.

4. Factores Indirectamente Influenciados pelas Alterações Climáticas – estes factores não são directamente modificados pelas alterações climáticas mas sofrem influência e alterações a partir de processos que podem ser desencadeados ou modificados pelas alterações do clima. Os factores identificados são:

- *Cobertura Pedológica* – este factor não é directamente afectado pelas alterações climáticas mas por modificações nas condições de erosão, as quais dependem das modificações das condições de escoamento superficial, assim como das actividades humanas (na sua relação de resposta às alterações climáticas); outro aspecto é o da alteração dos funcionamentos físicos e biológicos do solo, provocado pelas alterações climáticas e que irá afectar quer a dinâmica hídrica no solo, quer o coberto vegetal.

Existe um conjunto de indicadores que se considera de especial importância para a definição da vulnerabilidade dos aquíferos às alterações climáticas e que inclusive têm sido por vezes utilizados nalgumas metodologias de vulnerabilidade a estas mesmas alterações climáticas aplicadas a zonas costeiras, sistemas sócio-económicos, etc., mas não à vulnerabilidade para os aquíferos, que é um tema ainda pouco estudado. Alguns destes indicadores poderão ser usados na elaboração de futuras metodologias de vulnerabilidade de aquíferos às alterações climáticas. Ao elaborar-se, nesta tese, uma primeira metodologia de vulnerabilidade de aquíferos às alterações climáticas escolheu-se destes factores aqueles de que se possuía mais informação tanto em termos de dados como de aplicação noutras metodologias de vulnerabilidade (ex.: método GALDIT), pois considerou-se que a análise de todos estes factores com vista a identificar os de importância secundária ou os redundantes, exige um esforço de investigação que cai fora do âmbito desta dissertação. A lista de factores/indicadores é a seguinte:

- **Indicadores Meteorológicos** – Neste conjunto devem considerar-se:
 - *Tendências de variação das precipitações médias anuais, sazonais e de tempestades;*
 - *Tendências de variação das temperaturas;*
 - *Tendência de variação da frequência e intensidade dos eventos extremos (tempestades, secas, etc.);*
 - *Tendências de variação da intensidade, duração e frequência do evento médio de precipitação.*

- **Indicadores Geológicos** – Neste conjunto podem considerar-se os seguintes aspectos:
 - *Tipo de litologia do aquífero* – aqui considera-se se as formações são:
 - *Lávicas* – deve distinguir-se entre as de natureza basáltica e as de carácter mais ácido;
 - *Piroclásticas indiferenciadas*;
 - *Pomitos*;
 - *Ignimbritos*;
 - *Brechas*;
 - *Depósitos hidromagmáticos e surtseianos*
 - *Sedimentares* – aqui inclusas estão os depósitos de vertente, de fajã, calcarenitos, calcários, arenitos, conglomerados, depósitos de areia de praia e da calhaus.
 - *Grau de Fracturação* – aqui consideram-se as seguintes possibilidades:
 - *Muito fracturado, fracturas limpas*;
 - *Muito fracturado, fracturas preenchidas*;
 - *Medianamente fracturado, fracturas limpas*;
 - *Medianamente fracturado, fracturas preenchidas*;
 - *Pouco fracturado, fracturas limpas*;
 - *Pouco fracturado, fracturas preenchidas*;
 - *Não fracturado*.
 - *Volume de regiões de escórias, brecha, áreas de maior permeabilidade versus volume total da formação* – aqui considera-se não apenas o conjunto de escórias/zonas preferenciais de circulação de uma escoada mas também, no caso das escoadas que tal o apresentem, a presença de tubos de lava:
 - *Abundantes tubos de lava e/ou vacúolos de grandes dimensões e conectados*;
 - *Poucos tubos de lava e/ou vacúolos de pequenas dimensões e/ou pouco conectados ou preenchidos*;
 - *Volume de escórias/zonas preferenciais de circulação superior a 30% do volume da escoada*;
 - *Volume de escórias/zonas preferenciais de circulação entre 20 a 30% do volume da escoada*;
 - *Volume de escórias/zonas preferenciais de circulação entre 10 a 20% do volume da escoada*;
 - *Volume de escórias/zonas preferenciais de circulação entre 5 a 10% do volume da escoada*;
 - *Volume de escórias/zonas preferenciais de circulação entre 0 a 5% do volume da escoada*;

- *Escoada compacta.*
- *Grau de alteração* – aqui considera-se as seguintes classes:
 - *Muito alterado;*
 - *Medianamente alterado;*
 - *Pouco alterado;*
 - *Muito pouco alterado;*
 - *Fresco.*
- *Calibração* – aplicado apenas aos depósitos sedimentares detríticos e às formações piroclásticas, as seguintes classes:
 - *Muito bem calibrados*
 - *Bem calibrados*
 - *Medianamente calibrados*
 - *Pouco calibrados*
 - *Muito pouco calibrados*
- *Grau de consolidação* – aplicável tanto aos depósitos sedimentares como às formações piroclásticas, assim como aos níveis de alteração, considera as seguintes classes:
 - *Não consolidados*
 - *Muito pouco consolidados*
 - *Pouco consolidados*
 - *Medianamente consolidados*
 - *Consolidados*
- **Indicadores Geomorfológicos** – Neste grupo devem considerar-se ao seguintes aspectos:
 - *Geomorfologia da zona costeira* – definida em cinco classes, que segundo o **Índice de Vulnerabilidade Costeira CVI** (Thieler e Hammar-Klose, 1999) embora adaptadas para a realidade açoreana, apresenta as seguintes susceptibilidades:
 - *Litoral de arribas rochosas consolidadas* – muito baixa;
 - *Litorais recortados, litorais de arribas de consolidação moderada* – Baixa;
 - *Arribas de baixa altitude e/ou baixa consolidação* – moderada;
 - *Praias de calhau, lagunas* – alta;
 - *Praias de areia, depósitos de vertente e fajã* – muito alta.
 - *Taxas de erosão e/ou assoreamento costeiro;*
 - *Declive do litoral;*
 - *Dimensão do aquífero* – aqui considera-se se os aquíferos são:
 - *Pequenos* – dimensões no geral inferiores a 10 km²;

- *Médios* – dimensões em regra entre 10 e 30 km²;
- *Grande* – dimensões em regra acima de 30 km².
- *Geomorfologia das zonas interiores* – aqui podem considerar-se as seguintes classes:
 - *Zonas aplanadas*;
 - *Topografia* – dividido nas mesmas classes consideradas para o idêntico parâmetro da metodologia DRASTIC (Aller *et al.*, 1987);
 - *Escoamento superficial* – divide-se nas seguintes subclasses:
 - *Ausência de escoamento*;
 - *Escoamento reduzido*;
 - *Escoamento moderado*;
 - *Escoamento elevado*;
 - *Escoamento muito elevado*.
 - *Zonas de caldeira*.
- **Indicadores Hidrogeológicos** – Aqui consideram-se os seguintes indicadores:
 - *Transmissividade/Condutividade* – tem uma importância especial para os aquíferos de base (ou situados em regiões costeiras não insulares).
 - *Funcionamento hidrogeológico* – considera os seguintes tipos:
 - *Fraturado*
 - *Misto*
 - *Poroso*
 - *Ligação hidráulica com outros aquíferos* – avalia as modificações nos volumes de água cedidos por drenância entre aquíferos;
 - *Tempos de residência* – avalia o esgotamento dos aquíferos, relacionado com a sua susceptibilidade à estiagem, aspecto especialmente importante nos pequenos aquíferos suspensos;
 - *Intrusão salina* – considera, como na metodologia GALDIT (Chachadi *et al.*, 2003), a importância da intrusão salina já existente mas associando a possibilidade do seu incremento pela subida do nível do mar.
 - *Espessura do aquífero* – idêntico ao índice com o mesmo nome da metodologia GALDIT (Chachadi *et al.*, 2003)
 - *Porosidade Eficaz* – dá uma indicação da capacidade de armazenamento dos aquíferos.
- **Indicadores Geográficos** – Neste conjunto considera-se:
 - *Altitude do aquífero*;

- *Distância à linha de costa* – importante sobretudo para os pontos de água sitos nos aquíferos de base; similar ao índice com o mesmo nome da metodologia GALDIT (Chachadi *et al.*, 2003).
- **Indicadores de Susceptibilidade à Subida do Nível do Mar** – De particular significado para os aquíferos costeiros ou para os aquífero/sistemas basais de zonas insulares. Neste conjunto de indicadores pode considerar-se:
 - *Área perdida de terra emersa* – refere-se à quantidade de área perdida por mor da subida do nível do mar (submersão + erosão). O **Global Vulnerability Assessment** (Hoozemans *et al.*, 1993; Hoozemans e Hulsberg, 1995 *in* SURVAS, 2000), de onde este índice e o seguinte foram extraídos, considera 4 classes de vulnerabilidade:
 - *Baixa* – menos de 3% de perdas;
 - *Média* – 3-10% de perdas;
 - *Alta* – 10 a 30% de perdas;
 - *Crítica* – mais de 30% de perdas.
 - *Área perdida de zonas húmidas* – sem importância para o arquipélago dos Açores, pode contudo ser bastante significativo para outras regiões litorais, refere-se à quantidade de área perdida por mor da subida do nível do mar (submersão + erosão). A metodologia do **Global Vulnerability Assessment** considera as mesmas 4 classes, com valores de perdas idênticas às do índice anterior;
 - *Taxa da subida local do nível do mar* – tal como os dois índices seguintes, é considerado no método **Índice de Vulnerabilidade Costeira CVI** (Thieler e Hammar-Klose, 1999);
 - *Intervalo médio entre marés*;
 - *Altura média das ondas*.
- **Indicadores de Vulnerabilidade à Poluição** – são considerados os seguintes parâmetros:
 - *Tipo de Aquífero* – considera os três tipos de aquíferos admitidos pela metodologia GALDIT (Chachadi *et al.*, 2003):
 - *Confinado*
 - *Não confinado*
 - *Semi confinado*
 - *Profundidade do nível de água* – corresponde, tal como os seguintes, ao parâmetro do mesmo nome da metodologia DRASTIC (Aller *et al.*, 1987), estando dividido no mesmo número de classes.
 - *Recarga total*;
 - *Natureza do solo*;
 - *Impacto da natureza da zona não saturada*;

- *Altura do nível de água acima do nível do mar* – corresponde ao parâmetro do mesmo nome da metodologia GALDIT (Chachadi *et al.*, 2003).
- **Indicadores antropogénicos** – indiciam a influência da acção humana sobre os recursos hídricos em condições de alterações climáticas. São considerados os seguintes parâmetros:
 - *Stress hídrico* – mede o impacto da alteração dos consumos humanos sobre os volumes de recursos disponíveis;
 - *Teor de cloretos*;
 - *Carga poluente no escoamento superficial* – dada em quantidade de azoto por unidade volúmica de água (mg/l de azoto);
 - *Valor de CBO*.

Embora os aspectos acima enunciados sejam factores importantes de vulnerabilidade às alterações climáticas, a caracterização destes na ilha Terceira não é suficientemente profunda para os utilizar numa metodologia de caracterização de vulnerabilidade, pelo que se optou por realizar uma abordagem mais simplificada do problema.

Na metodologia desenvolvida neste trabalho considerou-se a vulnerabilidade segundo três sectores: (1) Componente Quantitativa (recargas e reservas), (2) Componente Qualitativa, (3) Componente Actividades Económicas. É essa metodologia que nos sub-capítulos seguintes se apresenta.

10.2.1. A COMPONENTE DE VULNERABILIDADE DOS AQUÍFEROS ÀS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS: ASPECTOS QUANTITATIVOS

Os impactos das alterações climáticas no aspecto quantitativo, referem-se basicamente às questões da recarga dos aquíferos nas novas condições climáticas e da quantidade de água que os mesmos aquíferos podem armazenar. Para avaliar a vulnerabilidade dos aquíferos às alterações climáticas no que concerne aos aspectos qualitativos, consideraram-se os seguintes parâmetros:

O parâmetro *variações da recarga* dá uma indicação das variações da recarga para os diferentes cenários de alterações climáticas estudados, ou seja, é uma representação destes cenários e do seu controle sobre do ciclo da água (especificamente a componente recarga) que afecta os aquíferos.

A recarga, nos aquíferos livres, depende sobretudo dos *parâmetros NC e AGUT*, ou seja das condições de infiltração/escoamento superficial e do coberto vegetal. A recarga nos aquíferos semi-confinados depende não apenas da recarga que possam receber em zonas de contacto com a superfície mas também da recarga por drenância que possam receber a partir dos aquíferos subjacentes, ou seja, das suas ligações hidráulicas eficazes com os aquíferos superiores. Como não existem projecções da evolução do coberto vegetal (que, ao invés do parâmetro NC, reage rapidamente às variações do clima), decidiu-se ignorar este parâmetro – que apesar de importante no

controlo da recarga, não faz parte das características intrínsecas do aquífero – e centrar a análise apenas sobre o parâmetro NC.

O volume de água armazenável pelo aquífero (e que lhe permitirá ou não fazer face a condições prolongadas de estiagem) depende do volume total do aquífero e do seu volume de vazios (porosidade eficaz), ou seja, da combinação entre a sua *área, espessura e porosidade eficaz*.

Os *tempos de residência* são também parâmetros importantes dado que fornecem uma indicação da capacidade de esgotamento dos aquíferos.

As *ligações hidráulicas* serão importantes para os aquíferos confinados/semi-confinados pois estabelecem zonas de recarga por drenância a partir de aquíferos sobrejacentes, com frequência importantes, e também para os aquíferos livres que podem, por estas zonas, perder água para outros aquíferos.

Assim, para a análise da componente de impacto das alterações climáticas sobre os aspectos quantitativos dos aquíferos consideraram-se os parâmetros apresentados no Quadro LXXXVII.

Quadro LXXXVII – Parâmetros de Vulnerabilidade dos Aquíferos às Alterações Climáticas: Aspectos Quantitativos

Parâmetro	Classes	Índices
Variações da recarga (%)	≥ 35	10
	15 – 35	7
	5 – 15	4
	< 5	1
NC	100 – 75	10
	75 – 50	7
	50 – 35	4
	< 35	1
Área do Aquífero (km ²)	< 10	10
	10 – 30	5
	≥ 30	1
Espessura do aquífero (m)	< 10	10
	10 – 20	5
	≥ 20	1
Porosidade eficaz (%)	< 5	10
	5 – 10	7
	11 – 20	4
	≥ 20	1
Tempos de residência (dias)	< 30	10
	30 – 90	5
	≥ 90	1
Ligação hidráulica com outros aquíferos	Sim	10
	Não	1

O parâmetro **variações da recarga** reflecte os impactos impostos directamente pelas alterações de precipitação e temperatura sobre os sistemas aquíferos. É na realidade uma representação dos cenários de alteração climática e seus efeitos directos sobre o ciclo da água que afecta os aquíferos.

O parâmetro **NC**, que controla em última análise o volume de água destinada ao escoamento superficial e o volume que é conduzido para a recarga, é uma representação globalizante das capacidades de infiltração dos terrenos, sendo assim um descritor do grau de alteração das formações, da calibração dos seus elementos (nas formações piroclásticas), da densidade de fracturação e respectiva permeabilidade (que depende do preenchimento destas mesmas fracturas). Sendo um parâmetro relacionado com a capacidade dos terrenos em gerar escoamento, reflecte também as zonas de escoamento máximo e de escoamento nulo que se podem definir na ilha Terceira.

O parâmetro **área do aquífero** relaciona-se com o volume total que o aquífero poderá ter disponível para o armazenamento da recarga pelo que define parcialmente as condições de resiliência à estiagem por parte do aquífero e a sua capacidade para continuar a fornecer caudais às nascentes e outros pontos de abastecimento. Quanto menor for a área do aquífero, menor será em regra o seu volume de armazenamento e mais rápido o seu esgotamento em condições de estiagem prolongada.

O parâmetro **espessura do aquífero** está relacionado com o parâmetro volume do aquífero, combinando-se com a área do aquífero para dar este volume, e pretende ser uma imagem do volume total do aquífero, ou seja do volume que pode estar disponível para armazenar a recarga. Na ausência do conhecimento deste indicador pode utilizar-se apenas o parâmetro área do aquífero.

O parâmetro **porosidade eficaz** é o que, conjugado com o volume do aquífero (área versus espessura, ou apenas área, caso a espessura não seja conhecida) define o volume efectivo para o armazenamento da água. Um pequeno volume eficaz⁹⁸, ou seja uma reduzida capacidade de armazenamento não permite que um aquífero suporte prolongados períodos de estiagem sem perdas muito significativas de água, originando o esgotamento de grande parte das nascentes e outras saídas de água que em condições normais não ocorreria.

O parâmetro **tempo de residência** dá uma indicação da velocidade de circulação e portanto do tempo que decorre entre a água entrada no aquífero e essa mesma água atingir as saídas desse aquífero. Este parâmetro relaciona-se assim com o esgotamento dos aquíferos e a sua susceptibilidade à estiagem. Na ausência de valores para este parâmetro pode fazer-se um cálculo aproximado a partir das permeabilidades e máxima extensão do aquífero.

O parâmetro **ligação hidráulica com outros aquíferos** pretende definir os volumes de água transferidos entre aquíferos, ou seja as perdas registadas nos aquíferos superficiais e os acréscimos de recarga consequentes nos aquíferos subjacentes. Estes volumes de água removida por drenância são volumes que, para o aquífero alimentador deixam de estar disponíveis para nascentes e/ou outros tipos de extracção. Se a recarga se modifica com as alterações climáticas, esta percentagem de água cedida por tornar-se um volume importante na redução dos recursos hídricos dos aquíferos superficiais.

⁹⁸ Diferente de volume total (área x espessura) pois para um mesmo volume total, diferentes porosidades eficazes dão diferentes volumes eficazes (área x espessura x porosidade eficaz) de armazenamento. A área x porosidade eficaz não dá o volume total eficaz mas apenas o volume eficaz por unidade de volume.

Para este novo índice de vulnerabilidade dos aquíferos aos aspectos quantitativos das alterações climáticas, utilizou-se uma estrutura similar à desenvolvida para várias metodologias de vulnerabilidade (ex.: DRASTIC), subdividindo os parâmetros num conjunto de classes – entre 2 a 4, em função dos dados conhecidos para os Açores sobre os parâmetros classificados por estas – a que se atribuíram valores. Estes valores foram atribuídos de forma empírica, indicado o valor 10 as condições mais desfavoráveis, e o valor 1 as mais favoráveis. Admite-se que estes valores possam vir a sofrer alterações em estudos posteriores que se realizem sobre esta matéria. De seguida, atribuíram-se pesos ponderais aos parâmetros, em função da sua importância no controle do comportamento dos aquíferos às alterações climáticas. Estes pesos ponderais foram atribuídos empiricamente, dando o peso maior ao(s) parâmetro(s) assumidamente de maior influência, seguindo por ordem decrescente até ao menos influente. Tal como no caso dos índices, admite-se que, em estudos posteriores, os valores destes pesos ponderais possam ser modificados, se tal se verificar necessário. Em face do estudado neste e nos capítulos anteriores, considera-se que os parâmetros mais importantes na determinação da vulnerabilidade (aspectos quantitativos) são as variações da recarga e o parâmetro NC, seguindo-se as dimensões do aquífero e porosidade eficaz, propõe-se que este índice seja calculado por:

$$\text{Eq. 11: } AC1 = (4 \times \Delta RAQ + 4 \times NC + 3 \times Ar + 3 \times Ep + 3 \times Pe + 1 \times TR + 1 \times Dr)/18$$

Onde:

AC1 = Índice Vulnerabilidade às Alterações Climáticas/Quantidade

ΔRAQ = Parâmetro variação da recarga

NC = Parâmetro número característico

Ar = Parâmetro área do aquífero

Ep = Parâmetro espessura do aquífero

Pe = Parâmetro porosidade eficaz

TR = Parâmetro tempo de residência

Dr = Parâmetro drenância/ligação hidráulica com outros aquíferos

As classes de vulnerabilidade consideradas foram as seguintes (Quadro LXXXVIII):

Quadro LXXXVIII – Classes de Vulnerabilidade dos Aquíferos às Alterações Climáticas: Aspectos Quantitativos

Índice	Classe de Vulnerabilidade
7 – 10	Alta
4 – 7	Média
1 – 4	Baixa

10.2.2. A COMPONENTE DE VULNERABILIDADE DOS AQUÍFEROS ÀS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS: ASPECTOS QUALITATIVOS

Os impactos das alterações climáticas sobre a qualidade referem-se à degradação das águas seja por processos de concentração de sais na zona vadosa e aquíferos, ou pela intrusão salina, provocada naturalmente pela subida do nível do mar (para um aquífero não perturbado por extracções para consumo humano ou outros). Não se pretende aqui fazer a análise da poluição de origem antrópica originada como consequência da respostas de adaptação/mitigação às alterações climáticas. Esse aspecto analisa-se na componente de Impacto das Actividades Económicas. Esta componente de vulnerabilidade é distinta da metodologia GALDIT⁹⁹ porque considera outros aspectos de contaminação além dos resultantes da alteração do nível do mar. Para a análise da componente de impacto das alterações climáticas sobre os aspectos qualitativos dos aquíferos consideraram-se os parâmetros apresentados no Quadro LXXXIX.

Quadro LXXXIX – Parâmetros de Vulnerabilidade dos Aquíferos às Alterações Climáticas: Aspectos Qualitativos

Parâmetro	Classes	Índices
Volumes de recarga (hm ³)	≥ 100	10
	50 – 100	7
	20 – 50	4
	< 20	1
Carga poluente no escoamento superficial (mg/l azoto)	≥ 150	10
	50 – 150	7
	10 – 50	4
	< 10	1
Distância à superfície do solo (m)	< 10	10
	10 – 20	5
	≥ 20	1
Condutividade hidráulica da zona vadosa (m/d)	≥ 10	10
	1 – 10	7
	10 ⁻² – 1	5
	10 ⁻⁴ – 10 ⁻²	3
	< 10 ⁻⁴	1
Carga poluente nos solos e zona vadosa (mg/l azoto)	≥ 100	10
	50 – 100	7
	10 – 50	4
	< 10	1
Condutividade hidráulica no aquífero (m/d)	≥ 1 000	10
	100 – 1 000	7
	50 – 100	4
	< 50	1
Taxa de subida local do nível do mar (mm/ano)	≥ 1,5	10
	1 – 1,5	7
	0,5 – 1	4
	< 0,5	1
Distância à linha de costa (m)	< 500	10
	500 – 750	7
	750 – 1 000	4
	≥ 1 000	1

⁹⁹ Que lida com as questões do impacto do nível do mar sobre os aquíferos.

Parâmetro	Classes	Índices
Espessura do aquífero (m)	≥ 10	10
	7,5 – 10	7
	5 – 7,5	4
	< 5	1
Alterações no uso e ocupação do solo (densidade de novas espécies/unidade de área)	Muito alterado	10
	Medianamente alterado	7
	Pouco alterado	4
	Inalterado	1

Os **volumes de recarga** são um parâmetro importante na qualidade das águas pois deles depende a diluição ou não dos poluentes. Estes volumes de recarga, que dependem também da área do aquífero¹⁰⁰, dependem dos regimes de precipitação, dando portanto um indicador das alterações climáticas e sua influência na manutenção da qualidade química das águas. Se o volume de recarga for elevado, terá um maior poder diluente quer dos poluentes que já se encontram no aquífero quer dos que eventualmente possam ser arrastados durante a infiltração.

A **carga poluente no escoamento superficial** é um indicador do arraste de poluentes pelas alterações no escoamento superficial, e portanto do impacto deste factor na qualidade das águas dos aquíferos quando atinge zonas de recarga. Considerou-se como composto representativo o azoto, dado que este é um dos elementos mais difundidos à superfície dos solos, devido ao uso generalizado de adubos azotados, sendo também um dos nutrientes associados com os problemas de eutrofização dos corpos de água superficial e esta água eutrofisada pode, por infiltração, alcançar os aquíferos. Outra carga poluente importante nas águas do escoamento superficial são os pesticidas, herbicidas e fungicidas, mas normalmente tal contaminação costuma ter caracterização reduzida. Onde existir caracterização destes e doutros contaminantes nas águas de escoamento superficial sugere-se que se use o somatório das cargas poluentes totais em vez de apenas as concentrações de azoto.

Os aspectos directamente relacionados com a concentração de sais na zona vadosa e no aquífero dependem dos efeitos de capilaridade e assim da superficialidade do aquífero. O parâmetro **distância à superfície do solo** reflecte deste modo o potencial para os processos de capilaridade e eventual salinização da zona vadosa. Um outro parâmetro que poderá ser um bom indicador do risco de salinização é o **índice SAR** que pode substituir o parâmetro distância à superfície do solo nos locais onde for conhecido.

O parâmetro **condutividade hidráulica da zona vadosa** controla a velocidade progressão dos poluentes (e portanto o tempo disponível para o seu decaimento) até à zona saturada, controlando a vulnerabilidade à poluição que pode atingir o aquífero a partir da superfície e subsuperfície.

A **carga poluente nos solos/zona vadosa** é um parâmetro que define a carga de poluição que está disponível para alcançar o aquífero. Neste parâmetro inclui-se quer a poluição por nitratos e/ou pesticidas, herbicidas, fungicidas e efluentes de esgotos,

¹⁰⁰ Considerando um mesmo valor de infiltração, o volume infiltrado depende da área de infiltração; um aquífero com por exemplo 0,5 km² de área, para as mesmas condições de infiltração superficial, receberá um menor volume que um aquífero de 5 km² de área, razão porque este parâmetro deve ser definido por unidade de área.

como também a poluição que resulte da salinização da zona vadosa tanto devido a incrustações salinas (por processos de capilaridade) como ao efeito dos aerossóis; estes últimos são especialmente importantes em zonas costeiras e insulares. Embora se haja considerado como composto representativo o azoto, dado que é um dos elementos mais difundidos à superfície dos solos devido ao uso generalizado de adubos azotados, os pesticidas, herbicidas, fungicidas, salinizações da zona vadosa e outras fontes de contaminação deverão ser consideradas sempre que existir informação relativa a estas. Onde existir tal informação sugere-se que se use o somatório das cargas poluentes totais em vez de apenas as concentrações de azoto.

A **condutividade hidráulica no aquífero** é um parâmetro que mede a progressão da intrusão salina para diferentes litologias expostas a uma mesma subida do nível do mar, e portanto é um indicador da vulnerabilidade do sistema em termos da qualidade das suas águas.

No que se refere à intrusão salina o parâmetro **taxa de subida local do nível do mar** é um indicador da intensidade com que a intrusão salina poderá progredir num determinado período de tempo. É também um indicador potencial da erosão costeira e da velocidade a que a interface água doce/água salgada poderá recuar devido à perda de área emersa. Os efeitos da subida do nível do mar podem ser moderados pela altura do nível de água acima do nível do mar, até um determinado limite, variável de local para local em função da taxa de subida do nível do mar e da altura da água doce no aquífero, dado que se estabelece o equilíbrio hidrostático entre a coluna de água doce e a de água salgada.

Outro parâmetro importante é a **distância à linha de costa**, pois quanto mais próxima uma região estiver da linha litoral, maior será o impacto da intrusão salina associada às alterações do nível do mar ou a outros fenómenos.

O parâmetro **espessura do aquífero** (ou da região saturada nos aquíferos livres) controla de igual modo o avanço da intrusão salina.

O parâmetro **alterações no uso e ocupação do solo** pretende reflectir as modificações na qualidade das águas geradas pelas alterações no uso e ocupação do solo causadas pelas alterações climáticas. Como se viu no Capítulo 5, o coberto vegetal controla a disponibilidade de água que pode ser direccionada para a recarga e a que se pode perder por evapotranspiração e portanto controla o volume de água de recarga e consequente capacidade de diluição de poluentes. O coberto vegetal pode também funcionar como fonte de absorção de certos compostos embora com mais frequência, no caso da ocupação do solo por culturas agrícolas, funcione como foco para o uso de adubos, herbicidas e pesticidas em quantidades que levam à poluição do meio hídrico. A alteração por exemplo do tipo de culturas agrícolas tem associada uma alteração na carga poluente para o meio hídrico subterrâneo. Nesta fase dos conhecimentos este parâmetro terá de ser definido em função de cenários, sendo avaliado por unidade de área de coberto vegetal alterado.

Este novo índice de vulnerabilidade dos aquíferos aos aspectos qualitativos das alterações climáticas foi desenvolvido segundo uma estrutura similar à de várias metodologias de vulnerabilidade (ex.: GALDIT), subdividindo os parâmetros num

conjunto de classes – entre 3 a 4, em função dos dados conhecidos para os Açores sobre os parâmetros por estas classificados – a que se atribuíram valores. Estes valores foram atribuídos de forma empírica, indicado o valor 10 as condições mais desfavoráveis, e o valor 1 as mais favoráveis. Admite-se que estes valores possam sofrer alterações em estudos posteriores que se realizem sobre esta matéria. Seguidamente atribuíram-se pesos ponderais aos parâmetros, em função da sua importância no comportamento dos aquíferos às alterações climáticas. Estes pesos ponderais foram atribuídos empiricamente, dando o peso maior ao(s) parâmetro(s) que, no estado actual dos conhecimentos, são admissivelmente os de maior influência, seguindo por ordem decrescente até ao menos influente. Tal como no caso dos índices, admite-se que em estudos posteriores estes valores possam ser modificados. Em face do estudado neste e nos capítulos anteriores, considera-se que os parâmetros mais importantes na determinação da vulnerabilidade (aspectos qualitativos) são os volumes de recarga, distância à linha de costa e altura do nível de água acima do mar, seguindo-se a taxa de subida do nível do mar, condutividade hidráulica, e por fim a espessura do aquífero, distância à superfície do solo e a carga poluente do escoamento superficial, propõe-se que este índice seja calculado por:

$$\text{Eq. 12: } AC2 = (4 \times VRAQ + 2 \times ESC_p + 2 \times Prof + 3 \times MAR + 4 \times D + 3 \times K + 2 \times Ep + 3 \times K_v + 2 \times Cps + 4 \times \Delta Veg) / 27$$

Onde:

AC2 = Índice Vulnerabilidade às Alterações Climáticas/Qualidade

VRAQ = Parâmetro volume de recarga

ESC_p = Parâmetro carga poluente no escoamento superficial

Prof = Parâmetro distância à superfície do solo

K_v = Permeabilidade da zona vadosa

K = Parâmetro condutividade hidráulica no aquífero

Cps = Parâmetro carga poluente no solo/zona vadosa

MAR = Parâmetro taxa de subida do nível do mar

D = Parâmetro distância à linha de costa

Ep = Parâmetro espessura do aquífero

ΔVeg = Parâmetro alterações no uso e ocupação do solo

As classes de vulnerabilidade consideradas foram as seguintes (Quadro XC):

**Quadro XC – Classes de Vulnerabilidade dos Aquíferos às Alterações Climáticas:
Aspectos Qualitativos**

Índice	Classe de Vulnerabilidade
7 – 10	Alta
4 – 7	Média
1 – 4	Baixa

10.2.3. A COMPONENTE DE VULNERABILIDADE DOS AQUÍFEROS ÀS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS: ACTIVIDADES ECONÓMICAS

As actividades humanas, ou seja os “factores antropogénicos”, que na realidade estão dependentes dos factores económicos, que mais afectarão a vulnerabilidade dos aquíferos são (cf. Capítulo 8):

- *Aumento das extracções para satisfação de maiores consumos* – os aquíferos de base e os pequenos aquíferos são particularmente vulneráveis.
- *Modificação da estrutura económica* – com uma mudança para actividades económicas que exigem maiores consumos (ex.: desenvolvimento da actividade turística) ou em contrapartida para actividades que levem uma maior racionalização no uso da água e eventual redução global do consumo.
- *Alteração das práticas agrícolas* – mudança do tipo de culturas ou práticas agrícolas para variantes que exijam maiores consumos de água, aumento das cargas de adubos, herbicidas e pesticidas, maiores necessidades em água do efectivo pecuário, expansão dos campos agrícolas com conseqüente remoção da vegetação natural.
- *Modificação do coberto vegetal natural* – desapareção de vegetação autóctone com forte efeito regulador sobre a recarga de aquíferos (ex.: *Sphagnum*) ou redução das áreas de vegetação com grande capacidade de captação da precipitação oculta e sua transferência para o solo.

Nos Açores as actividades com maiores impactos no volume de água consumida são as incluídas nos **Consumos Urbanos**, enquanto as actividades de maior impacto na qualidade são a **Actividade Agrícola**, seguida da **Actividade Industrial** (cf. Capítulo 8).

Os aspectos quantitativos destes impactos foram já analisados no Capítulo 8, com particular incidência no sub-capítulo 8.4. O outro leque de impactos das actividades humanas faz-se sentir sobre a qualidade dos recursos hídricos subterrâneos. Este impacto pode dever-se a uma intensificação da intrusão salina nos aquíferos costeiros, em consequência de maiores extracções para responder a maiores consumos, eventualmente acrescida dos impactos devidos às alterações do nível do mar. A qualidade dos recursos pode também degradar-se devido a cenários de evolução económica (com ou sem medidas de adaptação e/ou mitigação às alterações climáticas) que levem à substituição de algumas das actividades existentes por outras com uma carga poluente sobre o meio hídrico distinta da actual (ex.: alteração de práticas agrícolas).

Os impactos das actividades económicas reflectem-se assim sob aspectos quantitativos e qualitativos dos recursos hídricos, sendo distintos para os vários cenários de alterações climáticas. Basicamente os aspectos que intervêm nestes impactos são: (1) alteração dos volumes de água para consumos, que reflectem não apenas uma alteração dos consumos individuais mas também muitas vezes reflectem uma alteração na importância dos sectores económicos e respectivos volumes de consumos associados, (2) alteração nas cargas poluentes, devido a alterações na importância dos sectores económicos para o desenvolvimento local (o que está por sua vez associado a

estratégias de adaptação) e também alterações ao nível do tratamento e uso de efluentes como resultado de medidas de mitigação/adaptação que levem à reutilização de águas residuais em certos tipos de consumos (regadios, agricultura, etc.), (3) alterações no coberto vegetal, devido no geral a uma alteração na ocupação dos solos por modificação da importância das actividades económicas e/ou estratégias de adaptação, como por exemplo a modificação dos tipos de culturas exploradas, o desbaste de zonas arbustivas e arbóreas para novas culturas agrícolas ou silvícolas, ou pelo contrário a reflorestação de regiões que se tornaram de interesse economicamente marginal.

Para uma completa análise da componente de impacto das actividades económicas sobre os aquíferos em cenários de alteração climática será necessário definir cenários de evolução económica em função das alterações climáticas que indiquem as variações nos consumos e nas respectivas cargas poluentes, cenários esses que no estado actual dos conhecimentos não estão definidos para os Açores. Pode contudo admitir-se, com base na informação de DROTRH e IA (2001), que os melhores indicadores destes impactos serão: CBO, Azoto e Fósforo, dado serem estes os que melhor identificam as actividades mais poluentes no arquipélago. Deve contudo admitir-se que as alterações climáticas poderão vir a introduzir modificação ao nível das várias actividades económicas e alguns outros parâmetros poderão vir a revelar-se também como importantes indicadores.

Tomando em consideração o que acima foi explanado, podemos definir a vulnerabilidade às actividades económicas como a resiliência do sistema conjugado económico/natural às alterações provocadas pelas mudanças económicas devidas às alterações climáticas e classificar esta vulnerabilidade considerando os parâmetros apresentados no Quadro XCI:

Quadro XCI – Parâmetros de Vulnerabilidade dos Aquíferos às Alterações Climáticas: Aspectos Actividades Económicas

Parâmetro	Classes	Índices
Stress hídrico (% consumo sobre o total da recarga)	100 – 70	10
	70 – 50	7
	50 – 30	4
	< 30	1
CBO (mg/l)	≥ 5 000	10
	750 – 5 000	5
	< 750	1
Cloretos (mg/l)	≥ 1 000	10
	1 000 – 250	5
	< 250	1
Nitratos (mg/l)	≥ 50	10
	25 – 50	7
	10 – 25	4
	< 10	1

O parâmetro **stress hídrico**, reflecte os desequilíbrios provocados ao nível quantitativo sobre os aquíferos pela alteração dos consumos nas diferentes actividades económicas. Apesar de ser um parâmetro global, que não sistematiza a componente devida a cada actividade económica, é um bom indicador da eventual sobreexploração

dos aquíferos e portanto dos impactos dos consumos sobre a quantidade de recursos disponíveis nos vários cenários de alterações climáticas.

O parâmetro **CBO**, o parâmetro **cloretos** e o parâmetro **nitratos** (em forma de N simples) são, entre os parâmetros conhecidos e caracterizados para os Açores para os grandes grupos de actividades económicas, os que melhor reflectem de uma forma expedita, o impacto da poluição devida às actividades humanas, reflectindo desde a intrusão salina por sobreexploração (dada por exemplo pelos cloretos) até às mudanças na importância das actividades económicas e, por consequência, na sua carga poluente. O parâmetro nitratos pode ser utilizado em conjugação com o parâmetro fósforo, sempre que existirem dados fiáveis relativos às cargas poluentes de cada tipo de actividade económica/consumos; estes dois poluentes foram já contabilizados, para a situação actual (de referência) no Quadro LVII. Os valores de CBO por actividade económica (total) são apresentados para a situação de referência no Quadro LVIII.

O parâmetro **vegetação** é bastante importante dado que dele depende a extracção de água das zonas vadasas e aquíferos para a evapotranspiração; ele controla também as condições do escoamento superficial e portanto os processos de erosão e de acarreio de poluentes em dissolução ou suspensão nas águas de escorrência que podem ou não, à posteriori, vir a infiltrar-se nos solos e aquíferos a jusante. Contudo, dado não existirem projecções quanto à evolução do coberto vegetal sob os vários cenários de alterações climáticas para os Açores, nem quanto às variações de eficácia destes cobertos vegetais modificados e sob condições climáticas diferentes (as quais afectam o metabolismo das plantas) na remoção de poluentes da zona vadosa, optou-se por não se considerar este parâmetro na análise dos impactos das actividades económicas. Estudos são contudo necessários para definir concretamente a importância das variações da vegetação por acção da actividade humana, no controle das cargas poluentes que atingem os aquíferos.

Para este novo índice de vulnerabilidade dos aquíferos às actividades económicas em função das alterações climáticas, utilizou-se uma estrutura similar à desenvolvida para os índices atrás desenvolvidos (qualidade e quantidade), subdividindo os parâmetros num conjunto de classes – entre 3 a 4, em função dos dados conhecidos para os Açores sobre os parâmetros por estas classificados – a que se atribuíram valores. Estes valores foram atribuídos de forma empírica, indicado o valor 10 as condições mais desfavoráveis e o valor 1 as mais favoráveis. Admite-se que estes valores possam sofrer alterações em estudos posteriores que se realizem sobre esta matéria. Posteriormente atribuíram-se pesos ponderais aos parâmetros, em função da sua importância no controle do comportamento dos aquíferos às acções humanas devidas às alterações climáticas. Estes pesos ponderais foram atribuídos empiricamente, dando o peso maior ao(s) parâmetro(s) de maior influência, seguindo por ordem decrescente até ao menos influente. Admite-se também que, em estudos posteriores, os valores destes pesos ponderais possam ser modificados, se tal se verificar necessário. Em face do estudado anteriormente, considera-se serem o stress hídrico, CBO, teor de cloretos e teor de nitratos os parâmetros mais importantes na determinação da vulnerabilidade (aspectos actividades económicas) às alterações climáticas, propondo-se que este índice seja calculado pela seguinte expressão:

Eq. 13: $AC3 = (2 \times SH + 1 \text{ CBO} + 1 \text{ CI})/4$

Onde:

AC3 = Índice Vulnerabilidade às Alterações Climáticas/Impacto Actividades Humanas

SH = Parâmetro stress hídrico

CBO = Parâmetro CBO

CI = Parâmetro cloretos

As classes de vulnerabilidade consideradas foram as seguintes (Quadro XCII):

Quadro XCII – Classes de Vulnerabilidade dos Aquíferos às Alterações Climáticas: Actividades Económicas

Índice	Classe de Vulnerabilidade
7 – 10	Alta
4 – 7	Média
1 – 4	Baixa

A vulnerabilidade global resulta do somatório ponderado dos três índices – vulnerabilidade quantitativa, vulnerabilidade qualitativa, vulnerabilidade à actividade antrópica – com o índice de vulnerabilidade GALDIT, calculada pela expressão:

Eq. 14: $VAC = GAL + AC1 + AC2 + AC3$

Onde:

VAC = Índice de vulnerabilidade às alterações climáticas (componente atmosférica + nível do mar + antrópica)

GAL = Índice GALDIT (componente nível do mar)

AC1 = Índice Vulnerabilidade às Alterações Climáticas/Quantidade

AC2 = Índice Vulnerabilidade às Alterações Climáticas/Qualidade

AC3 = Índice Vulnerabilidade às Alterações Climáticas/Impacto Actividades Humanas

As classes de vulnerabilidade consideradas foram as seguintes (Quadro XCIII):

Quadro XCIII – Classes de Vulnerabilidade às Alterações Climáticas (componentes atmosférica + nível do mar + antrópica)

Índice	Classe de Vulnerabilidade
7 – 10	Alta
4 – 7	Média
1 – 4	Baixa

10.4. Discussão da Análise da Incerteza Associada à Determinação dos Parâmetros e Metodologias de Determinação da Vulnerabilidade às Alterações Climáticas

Neste capítulo reflecte-se sobre a incerteza associada aos parâmetros de vulnerabilidade às alterações climáticas.

Quando se tenta fazer uma análise dos impactos das alterações climáticas, a incerteza ocorre a vários níveis, a começar pelos resultados dos modelos de previsão de alterações climáticas; estes resultados são por sua vez usados como informação de entrada para a modelação destes impactos, por exemplo para os recursos hídricos subterrâneos. Estas incertezas podem agrupar-se nas seguintes áreas, de acordo com Carter e Hulme (2000, in Cramer *et al.*, 2000):

- **Factores impulsionadores/de base** – relacionam-se com as incertezas inerentes ao próprio desenvolvimento das sociedades humanas e portanto à previsão dos volumes de emissões. Este é um campo em que o conhecimento é largamente “não alcançável” e portanto a única forma de gerir as incertezas é aplicar conjuntos de cenários aos estudos de impacto;
- **Alterações climáticas** – admitem que as incertezas derivadas dos processos climáticos a larga escala, e em especial da componente aleatória destes processos e das escalas múltiplas a que ocorrem, serão talvez superiores às resultantes da resolução a escala regional/local das alterações climáticas; enquanto os modelos climáticos regionais (RCM's) podem fornecer uma informação mais credível das alterações climáticas em regiões de topografia heterogénea, estes modelos apresentam no entanto incertezas nas estimativas das alterações em grande escala similares aos modelos climáticos globais;
- **Subida do nível do mar** – as incertezas nas estimativa da subida do nível do mar a nível regional devido à expansão térmica dos oceanos (descontando já as questões das reduzidas séries de dados e possíveis erros de medição) são pelo menos da mesma ordem de grandeza das incertezas associadas às estimativas da subida do nível do mar a nível global; a isto há a juntar ainda a variabilidade da evolução local do nível do mar que é introduzida pelos fenómenos geológicos, e tem especial importância em áreas geologicamente activas.
- **Impactos** – as incertezas nesta área são fortemente dependentes do tipo de sector em análise, grau de exposição a estas alterações e região de estudo.

Segundo Arnell (1999) para a análise da incerteza associada ao **impacto de alterações climáticas sobre a componente hidrológica** seria necessário seleccionar não apenas pares sazonais de precipitação/temperatura mas seleccionar aleatoriamente grande número de séries temporais que deveriam ser depois introduzidas nos modelos hidrológicos e de recursos hídricos por forma a calcular a distribuição das possíveis alterações no indicador/variável em análise. Na realidade este procedimento é bastante moroso e pesado em termos de tempo de computação, sendo que, se se adicionasse as incertezas do modelo, tal análise tornar-se-ia de uma morosidade imensa. No entanto para alguns indicadores hidrogeológicos, estes podem ser estimados a partir de índices

climáticos relativamente simples, através de relações empíricas; contudo existem algumas armadilhas neste tipo de procedimentos (Arnell, 1999):

- As relações empíricas têm de reflectir os fenómenos dominantes de geração das alterações climáticas e nem todas o fazem;
- Muitos indicadores hidrológicos não podem ser determinados a partir de relações empíricas simples.

Para avaliar as incertezas associadas aos estudos de impacto das alterações climáticas, e portanto de vulnerabilidade dos sistemas a estas mesmas alterações, existem as seguintes metodologias de análise:

- Avaliação de especialistas;
- Experimentação/modelação sob condições controladas;
- Comparação dos erros resultantes das simulações dos modelos de impacto;
- Comparação da resposta dos modelos a alterações artificiais do clima;
- Comparação das diferenças entre estimativas dos modelos de impacto;
- Estudo de cenários não climáticos e de adaptação.

Dado o tipo de análises efectuadas neste estudo, afigura-se que, considerando os dados e resultados dos vários modelos usados, a metodologia de análise da incerteza mais adequada é a de **comparação da resposta dos modelos a alterações artificiais do clima**. Isto exige estudos específicos, fora do âmbito desta tese, com desenvolvimento de cenários e a consequente aplicação dos modelos a estes cenários, por forma a comprar as diferentes respostas dos modelos.

11. CONCLUSÕES FINAIS

Neste capítulo apresenta-se uma síntese dos trabalhos realizados, as conclusões alcançadas e apontam-se áreas que necessitam de estudos futuros.

11.1 Síntese

Nesta tese desenvolveu-se uma metodologia de vulnerabilidade dos aquíferos às alterações climáticas, e estabeleceram-se, para um conjunto de cenários teóricos de variação de precipitação e de evapotranspiração, que pretendem reflectir um leque de cenários de alteração climática, rectas de correlação entre a variação da precipitação (e/ou da evapotranspiração) e as respectivas recargas. Foram também definidas de rectas de correlação entre variações de precipitação versus variação dos respectivos escoamentos para diversos pares NC/AGUT que reflectem diferentes associações solos/coberto vegetal. Embora estas associações sejam representativas dos pares solo/vegetação da ilha Terceira, elas representam associações comuns a outras regiões. Este estudo teve, com efeito, propósitos mais abrangentes do que apenas o impacto das alterações climáticas sobre os aquíferos desta ilha, pelo que se considerou um conjunto de cenários de alteração de precipitações e evapotranspiração que engloba um espectro de variação destas parcelas do ciclo hidrológico mais alargado do que o actualmente previsto para esta ilha.

Para os estudos relativos à variação das recargas (e escoamentos superficiais) em função das alterações climáticas, começou por se aplicar a séries conhecidas de precipitação e temperatura um conjunto de modificações conformes com as tendências de evolução destes meteoros indicadas por cenários de alteração climática, simulados por modelos climáticos globais e modelos regionais. Os cenários de alteração climática utilizados foram definidos nos estudo SIAM 1 e SIAM 2, assim como nalguns modelos climáticos do Meteorological Office.

As séries alteradas de precipitação e evapotranspiração foram usadas como dados de entrada no modelo de balanço hídrico BALSEQ. Inicialmente o objectivo seria não apenas obter resultados de recargas para diferentes séries modificadas de precipitação e evapotranspiração que reflectem os cenários de alterações climáticas mas também fazer a comparação destes resultados com os obtidos por outros modelos de balanço hídrico (hidrogramas de escoamento de ribeiras, hidrogramas de caudais de nascentes, variação de níveis piezométricos; cf. pg. 72), que tiveram de ser abandonados por falta de dados de base suficientes.

Com os resultados do balanço hídrico para as diferentes condições de evapotranspiração e precipitação fez-se a análise da variação da recarga para os diferentes cenários de precipitação e evapotranspiração, assim como do escoamento superficial, definindo-se a partir daqui rectas de correlação entre a variação da precipitação e recarga, precipitação e escoamento superficial, evapotranspiração e recarga, escoamento superficial e recarga. Definiu-se também a variação das recargas e

escoamentos superficiais, em percentagem, para cada um destes cenários e para diferentes condições de solo/vegetação. A partir daqui estabeleceu-se assim um conjunto de rectas de correlação entre as variações da recarga e variações da precipitação e as variações de evapotranspiração e recarga para cada par solo/vegetação (identificado por par específico de valores NC/AGUT). Estas rectas podem ser usadas para previsões de recarga neste tipo específico de associações solos/vegetação, no intervalo de variação de evapotranspiração e precipitação analisado neste trabalho.

Para a determinação dos aspectos intrínsecos dos aquíferos que controlam a resposta à recarga e interferem na vulnerabilidade dos mesmos às alterações climáticas, e após a sua caracterização quanto à génese, idade, estado de alteração, propriedades hidráulicas e funcionamento hidrogeológico determinaram-se qualitativamente os aspectos que afectam a susceptibilidade dos aquíferos às alterações climáticas (área, tipo litológico, grau de alteração, permeabilidade, capacidade de armazenamento) e, deste modo, à estiagem, variação do escoamento superficial e da recarga, e à intrusão salina.

Com vista ao desenvolvimento da metodologia de vulnerabilidade de aquíferos às alterações climáticas foi necessário analisar igualmente, dentro dos limites possíveis, os efeitos da subida do nível do mar sobre os aquíferos costeiros. Para tal começou por se tentar estabelecer cenários de alteração do nível do mar em função dos registos do marégrafo de Angra do Heroísmo. Uma vez estabelecidos estes cenários procurou-se definir as áreas costeiras que poderiam ser afectadas; isto coloca alguns problemas dado que não existem formulações universais de análise dos efeitos da erosão (reco da linha de costa, etc.) sobre litorais de arriba, que são os preponderantes na ilha Terceira e em vastas zonas costeiras de Portugal Continental. Assim pôde-se apenas tentar definir a zona de recuo do litoral na praia de areia da ilha e a faixa que poderia ser submersa pela alteração do nível do mar, por forma a definir que pontos de água litorais poderiam ser afectados por este processo. Procurou-se também fazer uma modelação sucinta, elementar, em função dos dados que se possuíam, da progressão da intrusão salina para cada um dos cenários de alteração do nível do mar, por forma a definir a faixa de aquíferos costeiros afectada por estas modificações e deste modo determinar e delimitar, em função das suas características intrínsecas, os diferentes sectores dos aquíferos costeiros mais susceptíveis à intrusão salina. Considera-se ser necessário, em estudos futuros, realizar uma detalhada modelação matemática mas para tal será necessário um trabalho extensivo de levantamento detalhado das características dos aquíferos na zona litoral, que englobe no mínimo, as mais importantes das numerosas heterogeneidades deste tipo de sistemas aquíferos insulares.

Para a análise do impacto da resposta das acções humanas às alterações climáticas sobre os sistemas aquíferos começou-se por, a partir dos actuais volumes de consumos e dos cenários de crescimento sócio-económicos, tentar fazer a projecção dos consumos para 2100 (limite temporal para os cenários de alteração climática e subida do nível do mar). Considerando de seguida os cenários de alteração climática, nomeadamente no aspecto temperatura, e na ausência de cenários de evolução sócio-económica dos consumos de água que entrem em consideração com os efeitos provocados nos consumos por estas mesmas alterações climáticas, estabeleceu-se um incremento simplificado de consumos directamente proporcional à subida média das temperaturas. A partir daqui calculou-se um volume de consumos para 2100. Usando as

variações de recarga calculadas para os vários cenários de alteração da precipitação e evapotranspiração, calcularam-se os novos volumes de recarga e os novos caudais de nascentes e, como os novos valores de consumos, calculou-se o stress hídrico global imposto sobre os aquíferos da ilha.

A metodologia de vulnerabilidade dos aquíferos às alterações climáticas foi estabelecida a partir de dois vectores: (1) **alteração do nível do mar**, (2) **alteração das condições climáticas**. A vulnerabilidade dos aquíferos às alterações do nível do mar determinou-se a partir da **metodologia GALDIT**. Para a vulnerabilidade dos aquíferos às alterações do clima (componente atmosférica *sensus stricto*) foi desenvolvida uma **metodologia nova**, que se edificou segundo três componentes: (a) componente quantitativa, (b) componente qualitativa, (c) componente antrópica. Na **componente quantitativa** avalia-se a susceptibilidade dos aquíferos às alterações dos regimes de precipitação, isto é, nas alterações provocadas nos volumes de recarga e água armazenados nestes aquíferos nas novas condições climáticas, através da quantificação dos parâmetros *Variações da recarga (%)*, *NC*, *Área do aquífero*, *Espessura do aquífero*, *Porosidade eficaz*, *Tempos de residência*, *Ligação hidráulica com outros aquíferos*. Na **componente qualitativa** é avaliada a susceptibilidade dos aquíferos à degradação das águas por processos naturais (concentração de sais na zona vadosa, etc.) associados às novas condições climáticas, o que é obtido através da quantificação dos parâmetros *Volumes de recarga (hm³)*, *Distância à superfície do solo*, *Taxa de subida local do nível do mar*, *Distância à linha de costa*, *Condutividade hidráulica no aquífero*, *Condutividade hidráulica da zona vadosa*, *Espessura do aquífero*, *Carga poluente no escoamento superficial (mg/l azoto)*, *Carga poluente no solo e zona vadosa (mg/l azoto)*, *Alterações no uso e ocupação do solo* (densidade de novas espécies/unidade de área). Na **componente antrópica** avalia-se a susceptibilidade dos aquíferos às acções humanas de adaptação e mitigação às alterações climáticas, pela quantificação dos parâmetros *Stress hídrico*, *CBO*, *Cloretos* e *Nitratos*, que dão uma indicação da pressão dos consumos e da poluição sobre os aquíferos. O valor dos índices finais de cada uma destas componentes é somado ao valor do índice obtido pela metodologia GALDIT, obtendo-se um índice global de vulnerabilidade dos aquíferos às alterações climáticas.

11.2. Conclusões

Nestes sub-capítulo são apresentadas as conclusões obtidas para cada um dos aspectos estudados dos impactos das alterações climáticas sobre os recursos hídricos subterrâneos, seguindo a estrutura geral desta dissertação.

11.2.1. INTRODUÇÃO

Iniciando as conclusões pela avaliação do cumprimento dos objectivos explícitos propostos (cf. Capítulo 1), verifica-se que:

- ◆ ***Cálculo das tendências de alteração das recargas de aquíferos devidas às alterações nos regimes de precipitação e evapotranspiração, para diferentes condições de solo e coberto vegetal*** – foi feita a análise das recargas para distintos cenários de precipitação, evapotranspiração e precipitação + evapotranspiração para diferentes conjuntos de variáveis AGUT/NC que representa na realidade diferentes tipos de solo/coberto vegetal. Os cenários de precipitação e evapotranspiração foram obtidos modificando séries de precipitação actuais conhecidas em conformidade com as tendências de evolução da precipitação e temperatura (que condiciona a evapotranspiração) definidas para cada um dos cenários de alteração climática considerados. Foi usado um conjunto de cenários teóricos que no seu conjunto englobam a máxima amplitude de variação de precipitação e temperatura admitida pelo conjunto de cenários de alteração climática admitidos para os Açores. As variáveis AGUT e NC foram escolhidas por forma a retratarem um conjunto representativo de situações de solo/ocupação vegetal ocorrentes na ilha Terceira. A partir dos resultados obtidos para cada cenário de precipitação/evapotranspiração para cada par NC/AGUT estabeleceram-se rectas de avaliação da variação da recarga e do escoamento superficial para diferentes condições de evolução climática.
- ◆ ***Análise das características intrínsecas dos aquíferos e sua resposta às alterações climáticas*** – para se poder avaliar a resposta dos aquíferos às alterações climáticas, especialmente em termos de condicionamento da recarga e escoamento superficial para diferentes cenários de alterações climáticas, caracterizaram-se os sistemas aquíferos quanto à sua idade e génese (pois são condicionantes de propriedades hidráulicas como a permeabilidade), área, propriedades hidráulicas e funcionamento hidrogeológico. A partir desta análise foi possível definir quadros relacionais entre idades, litologias, permeabilidades, tipos de aquíferos e localização versus alterações da capacidade de infiltração para cada cenário de alteração climática. Definiu-se também para cada cenário de alteração climática em função do tipo de litologia e respectivo grau de alteração: (1) a variação das recargas e escoamento superficial para cada sistema aquífero, (2) áreas – definidas pelos respectivos pares NC/AGUT – com maiores variações de escoamento superficial e de recarga para diferentes cenários de modificação de precipitação e evapotranspiração, incluindo a definição de potenciais novas zonas de recarga ou de improdutividade, (3) os principais parâmetros definidores da susceptibilidade à estiagem, escoamento superficial, e intrusão salina, (4) os sistemas aquíferos/litologias mais afectados por estas modificações, (5) avaliação da modificação, face às diferentes condições de recarga impostas por cada cenário de alteração climática, da distribuição e extensão das zonas preferenciais de recarga e de descarga, assim como das regiões não produtivas.
- ◆ ***Análise dos impactos das alterações do nível do mar sobre os aquíferos costeiros*** – com base nos cenários de alteração do nível do mar estabelecidos a partir das observações em marégrafos avaliou-se a susceptibilidade dos aquíferos à intrusão salina, em termos qualitativos, em função sobretudo da permeabilidade dos aquíferos. Identificou-se deste modo os sectores onde a susceptibilidade ao aumento da intrusão salina forçada pela subida do nível

do mar será mais elevada e os pontos de água em maior risco de intrusão salina.

- ◆ **Análise dos impactos das acções humanas sobre as águas subterrâneas em diferentes cenários de alterações climáticas** – partindo-se da situação de referência actual dos caudais médios anuais e sazonais, volumes anuais drenados pelas nascentes e o que corresponde à recarga directa, calculou-se para cada cenário de alteração climática os volumes escoados pelas nascentes e a percentagem que corresponde à recarga. Fez-se a análise de referência dos consumos actuais e, em função dos cenários sócio-económicos de evolução dos consumos, sobrepostos a expectativas de alteração dos mesmos consumos em função de dois cenários de emissão de gases de efeito de estufa (cenários de temperaturas) calcularam-se os consumos previstos para os cenários de alterações climáticas. A partir destes novos consumos, novos caudais e novas recargas calculou-se o stress hídrico para cada cenário de alteração climática. Formulou-se também um índice de vulnerabilidade à estiagem.
- ◆ **Elaboração de uma metodologia de análise da vulnerabilidade de aquíferos às alterações climáticas** – foi criada uma metodologia de vulnerabilidade dos sistemas aquíferos às alterações climáticas que considera três domínios de vulnerabilidade: (1) vulnerabilidade à alteração do nível do mar, (2) vulnerabilidade às alterações dos regimes de precipitação e temperatura – aspectos quantitativos, (3) vulnerabilidade às alterações dos regimes de precipitação e temperatura – aspectos qualitativos, (4) vulnerabilidade às acções antrópicas – actividades económicas. Para a vulnerabilidade à alteração do nível do mar utilizou-se a metodologia GALDIT. Para as restantes componentes desenvolveram-se metodologias novas de vulnerabilidade, onde são definidos os respectivos parâmetros e classes de vulnerabilidade. A vulnerabilidade global resulta do somatório ponderado da vulnerabilidade à subida do nível do mar, vulnerabilidade às alterações dos regimes de precipitação e temperatura (aspectos quantitativos e aspectos qualitativos) e vulnerabilidade às acções antrópicas (actividades económicas/consumos, dado serem as únicas com alguma possibilidade de previsão das respectivas evoluções).

11.2.2. DETERMINAÇÃO DA RECARGA EM CENÁRIOS DE ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS

Para o horizonte temporal de 2100 o *cenário de emissões A2* calcula para a ilha Terceira um **decréscimo** geral da precipitação de 0 a 6% na precipitação média anual (descida no Verão entre 20 e 42%; subida no Inverno de 15 a 27%), embora com áreas onde se registre um leve aumento de até 4% (flanco S e W de Santa Bárbara e Guilherme Moniz-Ribeirinha). Para o *cenário B2* ocorre uma tendência de **subida** na precipitação média anual entre 0 a 10%, situando-se os valores médios na ordem dos 4% (descida no Verão entre 15 a 27%; subida no Inverno de 10 a 22%); esta é uma evolução levemente distinta, embora no mesmo sentido, da que se poderia inferir caso se considerasse apenas a *tendência evolutiva ao longo do século XX*, descrita em DROTRH e IA (2001) e Azevedo e Gonçalves (2003); segundo esta tendência a precipitação apresentaria uma leve **subida** da ordem dos 6%.

Na análise da variação das recargas e dos escoamentos superficiais provocados pelas alterações climáticas, para cenários de modificação da precipitação foram calculadas as recargas para a região do Cabrito (Quadros XII e XIV – Figs. 27 a 32) e, a partir dos valores de variação obtidos, para a globalidade dos aquíferos da ilha Terceira (Quadros XXIX e XXX). Foi igualmente calculada a variação das recargas para os vários cenários de modificação da precipitação (Quadros XIII e XV), sendo também calculadas rectas de correlação precipitação/recargas para os vários cenários de subida e de descida da precipitação, assim como para a totalidade destes cenários. Desta análise resulta que:

a) Nos solos com elevada capacidade de infiltração e ocupação vegetal de tipo arbóreo a variação da recarga com a descida da precipitação tende a ser a mais elevada, indiciando grandes perdas de recarga. Nos cenários de subida de precipitação a taxa de recarga é quase sempre a mais elevada, podendo chegar a ser duas vezes superior à taxa de subida da precipitação. As maiores perdas surgem nos cenários de maior redução de precipitação no Outono, assim como as maiores subidas, indicando a importância da resposta do coberto vegetal às alterações sazonais nos regimes de chuvas.

b) Os solos de baixa permeabilidade e ocupação vegetal arbórea têm perdas de recarga sempre superiores à redução da precipitação (e subidas quase sempre inferiores à subida da precipitação), especialmente significativas nos cenários com redução de precipitação de Outono, mesmo que as precipitações de Inverno aumentem até 50%. Isto indicia a importância, em solos de elevada capacidade de escoamento, dos regimes de precipitação sazonal da precipitação sobre a recarga. Nos cenários de subida de precipitação a subida da recarga é mínima se o coberto vegetal for de gramíneas.

c) Os solos de permeabilidade intermédia mostram no geral um comportamento semelhante de perda de recarga tanto para coberto vegetal arbóreo como de gramíneas.

d) Independentemente do tipo de vegetação ou natureza do solo, a proporção entre a percentagem de subida da recarga e a percentagem de variação da precipitação é sempre mais elevada quando se regista apenas uma subida de precipitação no Inverno e não ocorre qualquer decréscimo nas restantes estações do ano (Cenário 1; cf. Quadro XV).

Assim, se for aplicada uma modificação linear às séries de precipitação, a recarga seguirá de muito perto o incremento (ou decréscimo) linear aplicado. Quando a variação é diferente para os vários períodos do ano, a variação de recarga anual pode afastar-se de modo significativo do valor anual médio de alteração da precipitação, sendo o desvio tanto maior quanto maior for a variação da precipitação. Por exemplo os Cenários 20 e 60 apresentam uma redução da média anual da precipitação de, respectivamente, cerca 25% e 16%, e a redução de recarga média é cerca, respectivamente, de 31% e 20%, o que indicia a extrema importância das diferentes alterações da precipitação em períodos distintos do ano hidrológico.

Fazendo a análise do comportamento da recarga em função dos pares NC/AGUT (tipo de solo/vegetação)¹⁰¹ – cf. Figs. 35 e 36 – verifica-se que:

¹⁰¹ Para uma capacidade de campo inicial = 100 mm.

- **Par 105/1** – é o que apresenta o mais elevado incremento da recarga face à subida da precipitação e o decréscimo mais acentuado da recarga face à redução da precipitação.
- **Par 18/90** – é o que apresenta a menor subida da recarga face à subida da precipitação, e o que apresenta a menor redução da recarga face à redução da precipitação, talvez por apresentar à partida condições mais favoráveis ao escoamento superficial do que à recarga.

As rectas de regressão das Figs. 35 e 36 podem ser utilizadas para os respectivos pares de solo/coberto vegetal (NC/AGUT), para previsões muito simplificadas de alteração da recarga em função da alteração da precipitação.

Os escoamentos superficiais para os mesmos cenários de alterações da precipitação, para a região do Cabrito, são apresentados nos Quadros XVI e XVIII (Figs. 39 a 41). Foi igualmente calculada a variação dos escoamentos superficiais para os vários cenários de modificação da precipitação (Quadros XVII e XIX), sendo também calculadas rectas de correlação precipitação/escoamentos superficiais para os vários cenários de subida e de descida da precipitação, assim como para a totalidade destes cenários (Figs. 42 a 46). Desta análise resulta que:

a) Nas áreas de vegetação com menor dimensão radicular (ex.: pastos) e solos com mediana capacidade de infiltração a redução do escoamento é máxima com a redução da precipitação. Para a subida de precipitação o escoamento superficial aumenta, em especial se as zonas de menor espessura radicular se situem em solos com mediana capacidade de infiltração.

b) Nos solos com elevada capacidade de infiltração e ocupação vegetal de tipo arbóreo toda a precipitação é absorvida, mantendo-se condições de não escoamento.

c) Para solos de escoamento superficial significativo, a capacidade de infiltração parecer ser a principal responsável pela modificação dos valores de escoamento dado que solos de idênticas capacidades de infiltração, quer para cobertos arbóreos quer para gramíneas, mostram valores muito próximos, parecendo que a redução de precipitação restringe o efeito do controle da vegetação sobre o escoamento. Por seu lado, nos casos de aumento da precipitação, as alterações do escoamento superficial são mínimas, talvez por estarem já à partida muito perto do escoamento máximo possível.

d) As zonas com capacidade para produzir escoamento intermédio são as que registam maiores incrementos de escoamento superficial com a subida das precipitações.

e) A vegetação mostra um controlo sobre o escoamento, sendo que em condições idênticas de NC a cobertura arbórea consegue reter um pouco mais de escoamento do que a cobertura de gramíneas; no entanto este controlo é relativamente moderado para terrenos com elevada capacidade de escoamento (NC = 90 e 91).

A redução da precipitação leva a uma redução do escoamento superficial, podendo esta redução compreender-se entre valores 2 a 3 vezes superiores à taxa de redução da precipitação; a situação mais drástica é a de coberto vegetal herbáceo em solos de média a alta infiltração (par AGUT/NC = 56/38), onde se pode chegar, nos casos mais extremos de redução da precipitação, aos 80% de redução do escoamento

superficial. A subida da precipitação origina um aumento do escoamento superficial em média, para o total do conjunto de AGUT/NC, a cerca de 2 a 2,5 vezes superiores à taxa de variação da precipitação; também aqui o par AGUT/NC = 56/38 tem a maior variação, podendo chegar a incrementos de escoamento superficial de quase 200% face à situação de base (década de 1990).

Feito um estudo similar para as variações de recarga com a evapotranspiração (Quadros XX, XXI, XXII, XXIII e Figs. 47 a 52) tanto para o Cabrito como para a globalidade dos aquíferos da ilha Terceira (Quadros XXXI e XXXII), com a correlação entre as variações da recarga para os diferentes cenários de evapotranspiração apresentada nas Figs. 53 e 54, e a relação recarga/evapotranspiração para os vários pares NC-AGUT (Figs. 55 e 56) concluiu-se que:

a) A variação da recarga é inversamente proporcional à da evapotranspiração. As variações na recarga são máximas em solos de baixa permeabilidade que possuam coberto vegetal arbóreo (AGUT/NC = 186/91).

b) As condições onde a variação de recarga é menor registam-se para coberto de gramíneas e solos de média a alta permeabilidade (AGUT/NC = 56/38), o que pode indicar que a cobertura de gramíneas causa no geral menores oscilações na recarga que outros tipos de vegetação, sendo esse efeito ainda mais reduzido em solos de intermédia a alta permeabilidade, e que, portanto a resposta do solo é importante no controlo da recarga.

Em regra o valor médio de variação da recarga, parece apresentar um menor relação de linearidade com a variação da evapotranspiração, face ao que sucedia no caso da precipitação. Verifica-se que, neste caso, a vegetação exerce uma forte influência, observando-se que as zonas onde a variação de recarga é mais significativa são as que correspondem a um coberto vegetal com grande desenvolvimento radicular e ao mesmo tempo a um solo com maior tendência impermeável. Tipicamente as zonas de solos com maiores permeabilidades registam as variações menores, sobretudo se o coberto vegetal tiver uma profundidade radicular mediana a baixa. Isto aponta para, não apenas a importância da permeabilidade dos solos na resposta a alterações da parte superficial do ciclo hídrico mas também para a extrema importância do coberto vegetal na regulação hídrica dos aquíferos em situações de subida global das temperaturas atmosféricas.

As rectas de regressão das Figs. 55 e 56 podem ser utilizadas para os respectivos pares de solo/coberto vegetal (NC/AGUT), para previsões mui simplificadas de alteração da recarga em função da alteração da evapotranspiração.

Para o cenário de variação da precipitação e da evapotranspiração considerado, cujos resultados de recarga e de escoamento superficial se apresentam nos Quadros XXIV, XXV, XXVI e XXVII, para o Cabrito, o volume total de recarga sobe e os valores calculados apontam para que, num cenário de subida moderada de recarga e de evapotranspiração, as zonas actualmente menos permeáveis são as que sofrem um menor incremento da recarga e portanto serão as áreas em maior risco de sofrerem impactos mais adversos; as zonas de permeabilidade média e que simultaneamente possuam uma vegetação com espessura radicular moderada serão as que registarão um maior acréscimo da recarga. Ocorre também um aumento do escoamento superficial de

cerca 11%, em média, face à situação de referência, para o conjunto de pares NC/AGUT considerados: as situações com maior incremento são as de solos com capacidade de infiltração intermédia, independentemente de possuírem um coberto arbóreo ou arbustivo/herbáceo (pares AGUT/NC = 105/56 e 97/61) enquanto a que não regista qualquer alteração é a de NC = 1. Se se comparar a variação da precipitação com a variação do escoamento, verifica-se que o escoamento superficial aumenta face à precipitação de forma muito idêntica à verificada para os cenários de subida de precipitação = 6% sem aumento da evapotranspiração. Isto sugere que uma subida da evapotranspiração de 1,5% talvez não seja suficiente para causar impactos significativos no escoamento se for acompanhada de uma subida da precipitação pelo menos 4 x superior.

11.2.3. RESPOSTA DAS PROPRIEDADES DOS AQUÍFEROS ÀS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS

Realizou-se a correlação entre a génese e idade dos sistemas hidrogeológicos (Quadro XXXIV), estados de alteração (Quadro XXXIX) e litologias respectivas (Quadro XLI), daqui resultando a identificação dum grupo de factores que afectam a susceptibilidade dos aquíferos às alterações climáticas. Entre estes destacam-se: (1) **Permeabilidade** (relacionada com a idade e o estado de alteração das formações), (2) **Capacidade de Armazenamento** (relacionada com a área do aquífero e a sua porosidade eficaz, donde indirectamente com o seu estado de alteração), (3) **Superficialidade do Aquífero**, (4) **Recarga**. A análise da influência destes factores sobre tal susceptibilidade dos sistemas aquíferos é apresentada nos Quadros XLII, XLIII e XLIV. Daqui resulta, entre outras conclusões que os aquíferos de menores dimensões são os mais susceptíveis às alterações climáticas, mesmo que a sua recarga seja alta em termos absolutos, dado que a sua capacidade de armazenamento, ou mais especificamente o seu volume eficaz de armazenamento, por mor das suas dimensões, é reduzido; os aquíferos pouco permeáveis, em especial se os níveis aquíferos individualizados são de pequenas dimensões, tornam-se muito susceptíveis; aquíferos muito permeáveis, de grandes dimensões, grande capacidade de infiltração e de armazenamento são no geral aquíferos pouco susceptíveis, pelo menos a curto prazo, às variações de recarga induzidas pelas alterações climáticas. Na sua generalidade os aquíferos da ilha são bastante susceptíveis às alterações climáticas dada a dependência absoluta dos regimes de chuvas para a sua recarga, reduzida dimensão da maioria, rápida circulação e esgotamento e um no geral baixo coeficiente de armazenamento baixo.

Foi também realizada uma primeira análise da susceptibilidade ao aumento da intrusão salina, escoamento superficial e estiagem para diferentes cenários de alteração climática (Quadro XLVII), assim como a correlação entre litologias, estado de alteração, idades e permeabilidade com a resposta da capacidade de infiltração às alterações climáticas (Quadro XLVIII).

Ao caracterizar as zonas de recarga preferencial para diferentes cenários de alteração climática conclui-se que:

- ◆ **Cenários de Alteração da Precipitação** – áreas de escoamento superficial quase nulo a nulo, seguidas de áreas de escoamento moderado a baixo e

coberto de gramíneas, representadas por exemplo pelos sectores Central, Ribeirinha, Serra de Santiago; as zonas de “infiltração total” correspondem aos Cinco Picos, Graben ou ao Cabrito. Estas últimas zonas podem vir a perder parte significativa do volume de recarga que actualmente se verifica, no caso de cenários de redução da precipitação. Um comportamento semelhante será de prever para as áreas de Biscoitos-Terra Chã com cobertura vegetal similar à do Cabrito.

- ◆ **Cenários de Subida da Evapotranspiração** – as zonas mais favoráveis à recarga são as de escoamento nulo, seguidas das com cobertura de gramíneas e escoamento moderado a baixo. As maiores perdas de recarga ocorrem em zonas de coberto arbóreo e solos muito pouco permeáveis, verificando-se também que nas zonas pouco permeáveis e zona radicular muito reduzida a redução de recarga se aproxima das perdas das áreas arbustiva/arbórea (Quadro XXI). A vegetação é um factor de grande importância no controlo das perdas de recarga e portanto a sua modificação afectará também a distribuição geográfica das zonas afectadas por tais perdas (ou acréscimos).
- ◆ **Cenários de Descida da Evapotranspiração** – as áreas que registam maior aumento da recarga são zonas de escoamento superficial elevado e cobertura arbórea (Quadro XXII). As zonas com menores aumentos de recarga são as de escoamento superficial moderado (infiltração média a alta) e cobertura herbácea.

Assim, para cenários de subida da precipitação, os sistemas aquíferos mais favorecidos são os situados em bacias endorreicas e onde se não verifique praticamente escoamento (ex.: Graben, Guilherme Moniz-S. Sebastião), seguidos das regiões de escoamento superficial reduzido e com coberto vegetal herbáceo (ex.: sectores de Serra de Santiago ou do Central), as quais poderão passar a desempenhar um maior papel na recarga dos aquíferos. Daqui resulta que as formações piroclásticas mais recentes (ex.: formações do sistema Ignimbritos das Lajes) ou as formações lávicas basálticas muito recentes com grandes níveis de escórias, densamente fracturadas e/ou com muitos tubos de lava são as que melhor podem acomodar aumentos da recarga no caso subidas das precipitações. As áreas de permeabilidade baixa tenderão a sofrer maior variação das recargas em função da variação das condições de precipitação e muito em especial da evapotranspiração.

11.2.4. RESPOSTA DOS AQUÍFEROS ÀS ALTERAÇÕES DO NÍVEL DO MAR

A partir dos dados, ainda que plenos de lacunas, actualmente disponíveis sobre o nível do mar, estabeleceram-se cenários de evolução do nível do mar (cf. Anexo 1), a partir dos quais se procurou definir as áreas litorais mais vulneráveis a estas alterações.

Além da questão da perda de área dos aquíferos litorais por recuo da linha de costa devida à erosão provocada pela subida do nível do mar (cf. Anexo 1 e pg. 180), o principal impacto da alteração do nível do mar sobre os aquíferos é a intrusão salina, a

qual depende também da permeabilidade das formações aquíferas¹⁰². Na ilha Terceira, e para a generalidade dos aquíferos, as permeabilidades parecem ser no geral moderadas a altas, por vezes mesmo muito altas, pelo que a maioria dos sistemas aquíferos é bastante susceptível a sofrer intrusão salina (cf. Quadro LII). Os aquíferos mais susceptíveis são os muito recentes, preferencialmente lávicos com grandes fracturas e alta densidade de fracturação e escórias, cujas fracturas e vazios não estão ainda colmatados e em especial nas zonas onde ocorram tubos de lava dado estas estruturas serem corredores de acesso preferencial da água do mar ao interior dos aquíferos; seguem-se os piroclásticos (neles se incluindo as formações ignimbríticas muito porosas) não alterados. As áreas com risco mais elevado de intrusão salina (descontando as regiões de eventual sobreexploração), dado serem zonas de muito elevada permeabilidade são: Biscoitos-Terra Chã (em particular a região de Biscoitos), Guilherme Moniz-S. Sebastião (em especial a zona de S. Sebastião), Ignimbritos das Lajes.

Os cenários de subida do nível do mar indicam que, os aquíferos suspensos de baixa altitude não parecem correr riscos de contactar com o oceano e portanto deverão continuar imunes ao problema da intrusão salina. Por seu lado, os poços e nascentes litorais da Terceira sofrem um significativo risco de submersão devido à erosão litoral e avanço do mar, consequentes desta subida do nível do mar, talvez o mais elevado do arquipélago, atingindo directamente os poços de maré e nascentes litorais até à cota dos 2 m embora, no caso da intrusão salina associada, este efeito se estenda mais para o interior, afectando pontos de água até pelo menos aos 10 m de cota.

11.2.5. CONSUMOS HUMANOS E STRESS HÍDRICO EM CENÁRIOS DE ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS

Foram calculados consumos a partir de cenários sócio-económicos do Plano Regional da Água dos Açores, a que se sobrepuseram cenários de emissão de gases de efeito de estufa (cenários A2 e B2, usados em SIAM, 2005 para os Açores), aos quais se associou um incremento hipotético dos consumos face aos valores das projecções actuais para 2020 (que não consideram a questão das alterações climáticas), os quais são apresentados no Quadro LXIV. De acordo com a evolução da precipitação e temperatura para os cenários A2 e B2 (cf. SIAM, 2005) admite-se que o stress hídrico na época de estio será mais acentuado no caso do cenário A2; no Inverno ambos os cenários indiciam a possibilidade do stress hídrico ser diminuído, pelo que uma das estratégias de adaptação às novas condições que evite o aumento do stress hídrico será, por exemplo, a construção de reservatórios de recolha das águas excedentárias de Inverno para serem usadas no Verão.

Foram calculadas as relações entre caudais das nascentes (zona do Cabrito) e recargas para cada um dos cenários de alteração climática (cenários de variação da precipitação, e/ou evapotranspiração, cujos resultados são apresentados nos Quadros LXV a LXVII). Foi igualmente calculada, para a região do Cabrito, a variação da recarga e caudais de nascentes para os vários cenários de alterações climáticas (ver

¹⁰² Também depende das alterações nos volumes de consumos, causadas pelas alterações climáticas e/ou pela evolução sócio-económica e, na realidade, por ambos estes factores.

Quadro LXIX). Verifica-se que nestes cenários as alterações nos valores da evapotranspiração originam sempre menores variações (e de sinal oposto) na descarga das nascentes ao passo que a variação na precipitação origina sempre uma variação maior (e do mesmo sinal) nos caudais das mesmas nascentes; por exemplo, nos casos de redução de precipitação, a consequente redução de caudais pode chegar aos 49%. Este valor ocorre quando a maior diminuição se dá no Outono, mesmo se no Inverno houver subida da precipitação, o que aponta para a importância da distribuição sazonal das precipitações no regime de escoamento das nascentes.

A partir do conhecimento da variação dos caudais das nascentes para cada cenário de alterações climáticas, e as projecções dos consumos (cf. pgs. 150 a 153) calculou-se o volume de recursos hídricos necessário para satisfazer os consumos e o stress hídrico associado, para valores totais anuais. Para condições propostas pelos cenários sócio-económicos, ignorando as alterações climáticas (cf. Quadros LXI a LXIII), e tomando a recarga de 193 hm³/ano e o volume de 18 hm³/ano de caudais das nascentes, verifica-se que para qualquer dos dois cenários as nascentes conseguem abastecer as necessidades, embora a taxa de exploração se situe acima dos 60% em ambos os cenários; para o volume total de recarga dos aquíferos, o total de consumos nunca ultrapassa os 12% (Quadro LXXI). Quando se consideram os cenários de modificação dos consumos devido às alterações climáticas (Quadro LXIV), ao calcular a relação consumos versus recarga (cf. Quadro LXX) verifica-se que, caso estas projecções reflectam uma realidade dos consumos em cenários de alterações climáticas, estes poderão não ser satisfeitos apenas a partir das nascentes, ou seja, ter-se-á de apostar noutras fontes alternativas de abastecimento, em que os aquíferos aparecem como a primeira e mais importante destas fontes. Mesmo nas condições mais favoráveis os consumos totais para a ilha Terceira perfazem no mínimo 8,4% da recarga total dos aquíferos e nas mais desfavoráveis podem ultrapassar os 34%, o que, associado a outros factores de risco como por exemplo a intrusão salina, poderá aumentar o stress hídrico sobre os aquíferos. Considerando que por exemplo para o cenário A2, podem ocorrer quebras de precipitação de 20%, tal pode indiciar a possibilidade uma forte pressão sobre os sistemas aquíferos.

É ainda desenvolvida uma metodologia de vulnerabilidade à estiagem, que se apresenta nas pgs. 204 a 211, sendo calculado o respectivo índice (Quadro LXXVII).

11.2.6. METODOLOGIA DE VULNERABILIDADE DOS AQUÍFEROS ÀS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS

Fez-se o desenvolvimento de uma metodologia de vulnerabilidade dos aquíferos às alterações climáticas considerando duas componentes: (1) vulnerabilidade à subida do nível do mar, (2) vulnerabilidade às alterações climáticas. Para a vulnerabilidade às alterações do nível do mar utilizou-se a metodologia GALDIT. Para a vulnerabilidade às alterações da componente atmosférica, foi elaborada uma nova metodologia, dado que as actualmente existentes não são vocacionadas para esta questão, em particular no que se refere aos aquíferos. Nesta nova metodologia consideraram-se três componentes: (1) Quantitativa (recargas e reservas), (2) Qualitativa, (3) Actividades Económicas.

Os resultados da análise da vulnerabilidade dos aquíferos às alterações do nível do mar (segundo a metodologia GALDIT), são apresentados no Quadro LXXXVI, verificando-se que os aquíferos muito vulneráveis às alterações do nível do mar são:

- *Caldeira de Guilherme Moniz-S. Sebastião, Ignimbritos das Lajes, Biscoitos-Terra Chã e Santa Bárbara Superior* – em todas as circunstâncias;
- *Labaçal-Quatro Ribeiras* – quando a distância à linha de costa é inferior a 500 m;
- *Graben* – no caso de aquífero livre, quando a distancia à linha de costa é inferior a 500 m; no caso de aquífero confinado, em todas as circunstâncias.
- *Os restantes aquíferos* apresentam vulnerabilidade moderada nas várias circunstâncias consideradas, sendo os menos vulneráveis, Santa Bárbara Inferior, Serra de Santiago e Serra da Ribeirinha.

Na metodologia de vulnerabilidade dos aquíferos às alterações climáticas (componente atmosférica), elaboraram-se sistemas de avaliação da vulnerabilidade nos aspectos quantitativo¹⁰³ e no aspecto qualitativo, assim como do aspecto associado aos impactos das actividades económicas.

Para o *aspecto quantitativo* definiu-se um conjunto de parâmetros, cuja identificação, assim como as respectivas classes e os valores associados são apresentados no Quadro LXXXVII. O cálculo do **Índice de Vulnerabilidade Quantitativa** faz-se pela Equação 11 (pg. 246), considerando-se que os parâmetros mais importantes na determinação da vulnerabilidade são as variações da recarga, NC, dimensões do aquífero e porosidade eficaz; estabeleceram-se também classes de vulnerabilidade a partir do valor deste índice (Quadro LXXXVIII). Para o *aspecto qualitativo* considerou-se apenas os aspectos de “origem natural” (concentração de sais na zona vadosa e aquíferos, intrusão salina provocada pela subida do nível do mar), isto é, sem influência directa da actividade humana. Foram também definidos um conjunto de parâmetros, respectivas classes e valores associados (cf. Quadro LXXXIX). O cálculo do **Índice de Vulnerabilidade Qualitativa** faz-se pela Equação 12 (pg. 250), com os parâmetros por ordem decrescente de importância: recarga, distância à linha de costa, altura do nível de água acima do mar, taxa de subida do nível do mar, condutividade hidráulica, espessura do aquífero, distância à superfície do solo e a carga poluente do escoamento superficial. As classes de vulnerabilidade são apresentadas no Quadro XC. Para o *aspecto actividades económicas* (ou *antrópicas*)¹⁰⁴ são consideradas o stress hídrico e a poluição de origem antrópica devido às estratégias de adaptação/mitigação da actividade humana. Definiu-se para este tipo de vulnerabilidade um conjunto de parâmetros, respectivas classes e valores associados (Quadro XCI), **calculando-se o Índice de Vulnerabilidade à Actividade Antrópica** pela Equação 13 (pg. 254). As classes de vulnerabilidade são apresentadas no Quadro XCII. A

¹⁰³ Dependente sobretudo da recarga dos aquíferos nas novas condições climáticas e da quantidade de água que os mesmos aquíferos podem armazenar.

¹⁰⁴ Os aspectos que intervêm nestes impactos são: (1) alteração dos volumes de água para consumos, (2) alteração nas cargas poluentes, (3) alterações no coberto vegetal, devido no geral a uma alteração na ocupação dos solos por modificação da importância das actividades económicas e/ou estratégias de adaptação.

vulnerabilidade global resulta do somatório ponderado dos três índices – vulnerabilidade quantitativa, vulnerabilidade qualitativa, vulnerabilidade à actividade antrópica – com o índice de vulnerabilidade GALDIT, sendo dada pela Equação 14 (pg. 254) e as respectivas classes de vulnerabilidade foram definidas no Quadro XCIII.

11.3. Áreas de Pesquisa Futura

Em relação aos cenários de alteração climática, ou mais exactamente aos resultados de simulação atmosférica destes cenários, que funcionarão como dados de entrada nos modelos de balanço hídrico, será necessário realizar-se os seguintes estudos por forma a obter-se uma caracterização mais detalhada dos vários processos que afectam o ciclo hidrológico subterrâneo:

1. Refinamento dos actuais cenários de alteração climática, obtendo projecções das durações médias e respectivas intensidades médias dos eventos de precipitação e sua frequência, necessárias para a utilização de modelos mais sofisticados de análise de recarga (cf. Oliveira, 2004).
2. Refinamento destes mesmos cenários de alteração climática para a obtenção de projecções dos regimes, frequência e intensidade média dos eventos de precipitação concentrada e fenómenos extremos tais como secas, ciclones e tempestades tropicais, dado ser território virtualmente virgem para a região dos Açores, em especial no aspecto quantitativo da sua evolução. Sem esta informação será inviável uma correcta avaliação ao nível de pormenor das alterações provocadas por estes processos nas recargas de aquíferos.
3. Refinamento dos mesmos cenários de alteração climática para definição de cenários de evapotranspiração para cada um dos cenários de alterações climáticas considerados para os Açores.
4. Determinação dos cenários de precipitação e evapotranspiração mais prováveis para os Açores.
5. Prosseguir a análise de pormenor das séries de temperatura/evapotranspiração e precipitação gerados pelo projecto SIAM 2, com vista à sua utilização noutros modelos de balanço hídrico para além do BALSEQ.
6. Estudos paleo-climáticos, por forma a compreender como a sucessão dos antigos climas afectou o comportamento hidrogeológico das formações.

Para uma avaliação mais pormenorizada das questões das modificações da recarga e escoamento superficial em cenários de alteração climática será necessário realizar-se:

1. Avaliações de escoamentos superficiais nas zonas de maior declive para vários cenários de alterações climáticas.
2. Um zonamento de pormenor dos solos (com especial incidência na determinação dos respectivos NC) e coberto vegetal de toda a ilha Terceira.
3. Um registo pormenorizado dos caudais de nascentes dos vários aquíferos, assim como dos caudais ocasionais das ribeiras, por forma a poderem ser

usados como base para as projecções de alteração dos escoamentos superficiais e esgotamento de aquíferos para diferentes cenários de alterações climáticas.

4. Formulação de cenários de evolução do coberto vegetal e respectivos volumes de evapotranspiração que esta nova vegetação provável consumirá.
5. Análise de maior pormenor, com recurso a trabalhos de campo, para definição e caracterização de novas zonas de recarga, escoamento superficial e descarga, e definição dos graus de impacto das alterações da recarga sobre os aquíferos para os vários cenários de alteração climática.
6. Análise quantitativa dos escoamentos superficiais para diferentes topografias, correlacionando com o tipo de solos e coberto vegetal nas respectivas bacias hidrográficas.

Para uma correcta avaliação da resposta das zonas de recarga, ou seja da susceptibilidade a diferentes condições climáticas devem realizar-se:

1. Ensaios laboratoriais onde se exponham amostras não alteradas dos solos a diferentes condições de precipitação/embebimento para avaliar as respostas dos meios aquíferos a diferentes intensidades, durações e frequências de eventos de precipitação. Convirá que as condições a testar simulem diferentes cenários de alterações climática, o que exige, antes do mais, um refinamento nos estudos climáticos que conduzam à criação de cenários com intensidades e frequências dos eventos de precipitação.
2. Ensaios de campo similares em zonas representativas das áreas de recarga dos vários sistemas aquíferos.
3. Estudos para definir possíveis relações quantitativas entre litologias, sua génese e respectivas permeabilidades.
4. Zonamento de pormenor das permeabilidades e produtividades dos aquíferos e estudos de pormenor que definam quando e onde se dão ligações hidráulicas entre diferentes aquíferos, caracterizando hidraulicamente estas áreas de conexão entre aquíferos.
5. Estudos de definição da variação na distribuição geográfica (e em área) das zonas de recarga para diferentes cenários de alterações climáticas.
6. Estudos que correlacionem os paleoclimas com a evolução da alteração dos materiais por forma a estabelecerem-se perfis de evolução das propriedades hidráulicas em função dos paleoclimas, as quais poderiam indiciar uma resposta diferencial da capacidade de infiltração para diferentes condições climáticas. Uma das formas de abordar este problema seria por exemplo realizar ensaios de alteração dos materiais para diferentes condições de “chuva”, onde se registasse a variação progressiva das propriedades hidráulicas em função do tempo.

Para que se possa realizar no futuro uma concreta análise do impacto das alterações do nível do mar será necessário realizar:

1. Um registo sem lacunas das variações dos níveis do mar e estudos que permitam colmatar as actuais lacunas extensas nos registos dos marégrafos

dos Açores, as quais em muito limitam a validade de aplicação dos dados destes registos. Estes dados são basilares para o estabelecimento de cenários de alteração do nível do mar (e respectivas taxas de alteração) com um grau de incerteza aceitável.

2. O estudo da evolução do litoral, especialmente o estabelecimento de modelos de previsão do recuo da linha de costa em função da subida do nível do mar, para os litorais de arriba e praias de seixo, preponderantes nos Açores. Tanto esta como a tarefa anterior deverão ser realizadas pelos especialistas da dinâmica litoral.
3. Uma caracterização detalhada das permeabilidades da zona litoral, necessária para a correcta modelação da intrusão salina, o que inclui um extensivo trabalho de campo, pois esta caracterização é o ponto de partida para a modelação da intrusão salina tanto nas condições actuais como em cenários de alteração do nível do mar. Este conhecimento será também necessário para a aplicação das metodologias de vulnerabilidade, como é o caso da metodologia GALDIT ou a metodologia que neste trabalho se desenvolve.
4. Um extenso trabalho de simulação da intrusão salina para diferentes taxas de recarga (representativas dos cenários de alterações climáticas aceites para os Açores), as permeabilidades determinadas a partir dos estudos da alínea anterior e os cenários de alteração do nível do mar, estabelecidos a partir dos trabalhos da alínea 1.

Na questão da análise dos consumos humanos e stress hídrico imposto aos aquíferos, será necessário realizar os seguintes estudos:

1. Cenários de adaptação das actividades agrícolas que definam, para cada cenário de alteração climática¹⁰⁵, os tipos de culturas e actividade pecuárias, o tipo de alterações induzidas no coberto vegetal, assim como os **respectivos consumos em água** (regas, evapotranspiração, água para o gado). Este é um aspecto a ser estudado por agrónomos e economistas.
2. Cenários de **consumos em água** urbanos, energéticos e industriais, para cada cenário de alteração climática, onde se considere a alteração dos consumos por estratégias de adaptação e mitigação (ex.: o aumento de consumo per capita como resposta a climas mais quentes, devido a novos usos da água, etc.). Este tipo de estudos deverá ser feito por sociólogos e economistas.
3. Definir concretamente os **actuais consumos no sector agro-pecuário e agrícola** não relacionado com a pecuária, pois a informação sobre estes – e que é a base para a construção de cenários futuros de consumos – está ainda mal conhecida, em especial em actividades associadas à criação de gado (ex.: rega e manutenção das pastagens) e no que respeita às actividades agrícolas não directamente envolvidas com a pecuária.
4. Caracterizar em detalhe, para todos os sistemas aquíferos, não apenas as recargas mas também o caudal das respectivas nascentes associadas, os volumes de água cedido por drenância a outros aquíferos e o volume de consumos, global e por actividade económica, suportado pelas nascentes (e furos) de cada sistema aquífero. No caso dos caudais das nascentes deverá ser

¹⁰⁵ Cenários de emissões de gases de efeito de estufa A2 e B2 definidos pelo IPCC (cf. SIAM, 2005).

definido não o volume médio global debitado mas também os volumes médios de estiagem e de invernia. Só com estes dados de pormenor se poderá conhecer com algum grau de significância, o stress hídrico mais provável para cada cenário de alteração climática. Os valores de caudais estiagem e invernia por sistema aquífero são basilares para definir as situações de ponta.

5. Após os estudos anteriores rever as proporções consumos/recargas/descargas de nascentes e poços, para definir um stress hídrico mais próximo de uma futura realidade.
6. Para a definição futura mais exacta da susceptibilidade dos aquíferos à estiagem deverão realizar-se estudos, por sistema aquífero, para avaliar os tempos de residência das águas e a profundidade dos níveis produtivos mais superficiais.

Relativamente ao desenvolvimento da metodologia de vulnerabilidade dos aquíferos às alterações climáticas, por forma a colmatar lacunas que actualmente apresenta, deverão realizar-se estudos de:

1. Definição concreta, com trabalhos de campo, da extensão da intrusão salina actual e respectiva quantificação das modificações hidroquímicas das águas.
2. Caracterizar os aquíferos na faixa costeira em termos do seu funcionamento, definindo os sectores que possam funcionar como aquíferos livres, confinados ou semi-confinados, a altura do nível piezométrico acima do nível do mar e a espessura saturada do aquífero na bordadura litoral. Os estudos destas duas alíneas são necessários para uma elaboração mais correcta do zonamento da vulnerabilidade GALDIT.
3. Dado que, comparativamente às permeabilidades consideradas na metodologia GALDIT, as permeabilidades conhecidas da ilha Terceira são muito elevadas na sua generalidade, seria conveniente estudar adaptações desta metodologia que permitissem um zonamento mais fino da vulnerabilidade para estes casos de permeabilidades muito elevadas.

Para o aperfeiçoamento, que se considera necessário, da metodologia da vulnerabilidade às alterações climáticas (componente atmosférica) deveriam realizar-se os seguintes estudos:

1. Zonamento suficientemente pormenorizado da permeabilidade, condutividade e porosidade eficaz dos vários aquíferos da ilha Terceira em toda a sua extensão.
2. Definição das superfícies piezométricas e espessuras dos aquíferos, tempos de residência e ligação hidráulica com outros aquíferos e/ou lagoas, incluindo a definição dos volumes de drenância transferidos entre aquíferos e a recarga obtida a partir de lagoas e outros corpos de água superficial.
3. Definição da importância do controlo estrutural sobre o funcionamento hidráulico dos aquíferos, com especial atenção à definição espacial das áreas de barreira e de circulação preferencial dentro dos aquíferos e inter-aquíferos.

4. Identificação e caracterização de possíveis corredores hidráulicos que possam colocar em contacto aquíferos afastados do litoral com a interface água doce-água salgada (ex.: via zonas de circulação preferencial entre aquíferos).
5. Estabelecimento de cenários de desenvolvimento sócio-económico que incluam projecções sobre cargas poluentes descarregadas para o meio hídrico por grupo de actividade económica (de consumos de água), assim como quaisquer possíveis alterações que estas actividades venham a produzir sobre o meio físico susceptíveis de afectar a qualidade das águas.
6. Estudos com vista à calibração de pormenor da metodologia que aqui se desenvolveu, e sua aplicação a outros aquíferos insulares e litorais.

O estudo dos impactos das alterações climáticas sobre os recursos hídricos é de importância estratégica dado tais alterações afectarem o ciclo hidrológico e, deste modo, os recursos hídricos disponíveis para consumo humano, sejam estes superficiais ou subterrâneos. Estes estudos revestem-se de especial significado para as regiões insulares dada a sua dependência dos recursos hídricos subterrâneos, que por sua vez dependem dos regimes climáticos locais e sua evolução temporal. A presente tese procurou abordar a questão ainda pouco estudada dos efeitos das alterações climáticas sobre os recursos hídricos subterrâneos, incidindo sobre a questão da variação das recargas e da vulnerabilidade dos aquíferos às alterações do clima. Considera-se que esta área, longe de ter sido esgotada, se encontra de facto no início do seu desenvolvimento científico. Por este motivo a realização dos estudos acima indicados será fundamental para um melhor conhecimento dos impactos das alterações climáticas sobre os recursos hídricos subterrâneos. Sendo uma área muito vasta, complexa e plena de inter-relações com outras disciplinas, tais estudos, crê-se, constituirão apenas a ponta deste icebergue.

12. BIBLIOGRAFIA

1. ACAVACO, 1995 – *Estudo Hidrogeológico da Ilha do Corvo. Relatório Final*. Lisboa, pp. 10.
2. AGOSTINHO, J., 1938 – *Clima dos Açores*. Angra do Heroísmo, Açoreana, Vol. 2, Fasc. 1, pp. 36-65.
3. AGOSTINHO, J., 1941 – *Clima dos Açores*. Angra do Heroísmo, Açoreana, Vol. 2, Fasc. 4, pp. 224-267.
4. ALBRITTON, D., DERWENT, R., ISAKSEN, I., LAL, M., WEBBLES, D., 1996 – *Trace Gas Radiative Forcing Indices*. In: Houghton, J. T., Meira Filho, L. G., Callender, B. A., Harris, N., Kattenberg, A., Maskell, K. (Eds.), *Climate Change 1995: The Science of Climate Change* (Chapter 2), Cambridge University Press, Cambridge.
5. ALLER, L., BENETT, T., LEHER, J. H., PETTY, R., HACKETT, G., 1987 – *DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeological Settings*. U.S. Environmental Protection Agency, pp. 622.
6. ALVAREZ, L.W., ALVAREZ, W., ASARO, F., MICHEL, H.V., 1980 – *Extraterrestrial Cause for the Cretaceous-Tertiary Boundary Extinction*. Science, Vol. 208, pp. 1095-1108.
7. ALVAREZ, R. A. (Ed.), 1998 – *Proceedings of the Climate Change and Extreme Events Workshop for the US South Atlantic Coastal and Caribbean Region*. Florida, November.
8. ANDERSEN, F., USSHER, G., TEARNEY, K., 1982 – *Geothermal Prospection – Ilha Terceira, Açores. Geophysics Survey Report*. Ponta Delgada, Governo Regional dos Açores, Secretaria Regional do Comércio e Indústria.
9. ARNELL, N., 1999 – *Uncertainty in Climate Change Impact Studies in the Water Sector*. Web page site: <http://www.cru.uea.ac.uk/~markn/Eclat2/arnell/arnel.html> (consultado em 2002), pp. 5.
10. ARRUDA, C. V., 2004 – *Caracterização Climática das Ilhas do Faial e do Pico, com Base no Modelo CIELO*. Relatório de Estágio da Licenciatura de Engenharia Agrícola, Angra do Heroísmo, Universidade dos Açores, Departamento de Ciências Agrárias.
11. AUDSLEY, E., 1981 – *An Arable Farm Model to Evaluate the Commercial Viability of New Machines or Techniques*. Journal of Agricultural Engineering Research, Vol. 26, N.º 2, pp. 135-149.

12. AZEVEDO, E. B., MENEZES, J. C., MADRUGA, J. S., 1986 – *Inventário dos Pontos de Água: 1. Nascentes, Concelho de Praia da Vitória (relatório preliminar)*. Angra do Heroísmo, Universidade dos Açores, Departamento de Ciências Agrárias, pp. 151.
13. AZEVEDO, E. B., GONÇALVES, D. A., 1993 – *Alguns Aspectos da Temperatura e Precipitação na Ilha Terceira desde 1874*. Seminário “Recursos Hídricos e Ambiente”, Câmara Municipal de Angra do Heroísmo, pp. 26.
14. AZEVEDO, E. B., 1996 – *Modelação do Clima Insular à Escala Local (Modelo CIELO)*. Terra-Chã, Universidade dos Açores, Departamento de Ciências Agrárias, Tese de Doutoramento, pp. 246.
15. AZEVEDO, E. B., GONÇALVES, D. A., 2003 – *A Temperatura do Ar e a Precipitação na Ilha Terceira, Açores, desde 1874*. (in press).
16. AZEVEDO, J. M. M., PORTUGAL FERREIRA, M. R., 1996 – *As Funções Hidrogeológicas da Cobertura Vegetal (Sphagnum) e os Impactes da sua Remoção (Ilha das Flores, Açores)*. 3º Congresso da Água “A Água em Portugal: por uma Política de Excelência”, Lisboa, 1996, pp. III-527 - III-535.
17. AZEVEDO, J. M., PORTUGAL FERREIRA, M. R., 1997 – *Condições de Ocorrência e Funções Hidrogeológicas das Lagoas em Pequenas Ilhas Vulcânicas: o Exemplo da Ilha das Flores, Açores*. Lisboa, Comunicação apresentada ao 4º Congresso da Água “A Água como Recurso Estruturante do Desenvolvimento”, pp. 8.
18. AZEVEDO, J. M. M., 1998 – *Geologia e Hidrogeologia da Ilha das Flores (Açores-Portugal)*. Vols. I e II. Tese de Doutoramento no Ramo de Geologia, Departamento de Ciências da Terra, Universidade de Coimbra, Coimbra.
19. BARNETT, T. P., 1983 – *Recent Changes in Sea Level and their Possible Causes*. Climatic Change, Vol. 5, pp. 15-38.
20. BASHER, R., 1998 – *Environment Indicators for the Physical Climate System and Climate Change Impacts*. National Institute of Water and Atmospheric Research, December, pp. 17.
21. BAZZAZ, F.A., SOMBROEK, W.G., 1995 – *Global Climatic Change and Agricultural Production: an Assessment of Current Knowledge and Critical Gaps*. Web page site em: <http://www.fao.org/docrep/W5183E/w5183e0.html> (consultado em 2001), pp. 11.
22. BEAR, J., VERRUIJT, A., 1987 – *Modelling Groundwater Flow and Pollution*. Series “Theory and Applications of Transport in Porous Media”. D. Ridel Publishing Company, pp. 414.

23. BEDMAR, A. P., ZABALETA, E. P., RAMOS, M. M., 1999 – *Estudio Hidroquímico e Isotópico de las Aguas Subterráneas Aguas Abajo del Futuro Embalse de Alqueva (Portugal) sobre el Río Guadiana*. Informe Técnico para Ministerio de Medio Ambiente, Secretaria de Estado de Aguas y Costas, Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas. Informe Parcial, Tomo Único. Madrid, CEDEX – Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, pp. 55.
24. BEERSMA, J., AGNEW, M., VINER, D., HULME, M. (Ed.), 2000 – *Climate Scenarios for Water-Related and Coastal Impacts*. ECLAT-2 Workshop Report N.º 3, União Europeia, Climatic Research Unit UEA, Norwich, UK, pp. 142.
25. BEKESI, G., McCONCHIE, J., 1997 – *Regional Groundwater Modelling Using the Monte-Carlo Technique, Manawatu Region, New Zealand*. Web page sita em: <http://www.techbase.co.nz/applications/conf/paper1.html> (consultado em 2002), pp. 17.
26. BETTENCOURT, M. L., 1979 – *O Clima dos Açores como Recurso Natural, Especialmente em Agricultura e Indústria do Turismo*. Lisboa, Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica. O Clima de Portugal, Fasc. XVIII, pp. 103.
27. BORGES, P. A., 1995 – *Contribuição para o Conhecimento do Litoral Sul de São Miguel (Açores)*. Tese de PPCI Departamento de Geociências da Universidade dos Açores, pp. 168 (não publicado).
28. BORGES, P. A., 2001 – *Plano Regional da Água da Região Autónoma dos Açores – Zonas com Risco de Erosão (Ponto 12.4)*. Relatório Técnico-Científico 01/DGUA/2001. Departamento de Geociências da Universidade dos Açores, Centro de Geologia Ambiental. Janeiro, pp. 15.
29. BORGES, P. A., 2003 – *Ambientes Litorais nos Grupos Central e Oriental do Arquipélago dos Açores*. Dissertação de Doutoramento, Ponta Delgada, Universidade dos Açores, Departamento de Geociências
30. BRANDÃO, C., RODRIGUES, R., PINTO DA COSTA, J., 2001 – *Análise de Fenómenos Extremos: Precipitações Intensas em Portugal Continental*. Direcção dos Serviços de Recursos Hídricos, pp. 51.
31. BRIGUGLIO, L., KALY, U., PRATT, C., 1999 – *Report of the Meeting of Experts on the Environmental Vulnerability Index*. SOPAC, UNEP, Malta, December.
32. BRUUN, 1988 – *The Bruun Rule of Erosion by Sea Level Rise: a Discussion of Large-Scale Two and Three-Dimensional Suages*. Journal of Coastal Research, 4, pp. 627-648.
33. BURMAN, R. POCHOP, L. O., 1994 – *Evaporation, Evapotranspiration and Climatic Data*. Developments in Atmospheric Science, N.º 22, Elsevier, pp. 278.
34. CAERS, J., 2002 – *History Matching Under Training-Image Based Geological Model Constraints*. Stanford University, pp. 39.

35. CARTER, T. R., HULME, M., VINER, D. (Ed.), 1999 – *Representing Uncertainty in Climate Change Scenarios and Impact Studies*. ECLAT-2 Workshop Report N.º 1, União Europeia, Climatic Research Unit UEA, Norwich, UK, pp. 129.
36. CEM, 2002 – *Coastal Engineering Manual Outline. Draft Version. Chapter 3 – Coastal Sediment Processes*. Web page: <http://bigfoot.wes.army.mil/cem026.html> (consultado em 2001 e 2002), Ed. Dr. Walton Todd.
37. CHACHADI, A. G., LOBO FERREIRA, J. P., 2001 – *Sea Water Intrusion Vulnerability Mapping of Aquifers Using the GALDIT Method*. Coastin – a Coastal Policy Research Newsletter, N.º 4, pp. 7-9.
38. CHACHADI, A. G., LOBO FERREIRA, J. P., LÍGIA NORONHA, B. S. CHOUDRI, 2003 – *Assessing the Impact of Sea-Level Rise on Saltwater Intrusion in Coastal Aquifers Using GALDIT Model*. Comunicação apresentada ao Seminário Águas Subterrâneas, APRH, 2003.
39. CHACHADI, A. G., LOBO-FERREIRA, J. P., 2005 – *Assessing Aquifer Vulnerability to Sea-Water Intrusion Using GALDIT Method: Part 2 – GALDIT Indicators Description*. Proceedings of the 4th Inter Celtic Colloquim on Hydrogeology and Management of Water Resources, Univerisdade do Minho, Guimarães, Portugal, Julho, 11-13, pp. 12.
40. CHEN, C. C., GILLIG, D., McCARL, B. A., 2000 – *Effects of Climate Change on a Water Dependent Regional Economy: a Study of the Texas Edwards Aquifer*. US Department of Agriculture, pp. 18.
41. CHIN, M., ROOD, R. B., LIN, S.-J., MULLER, J.-F., THOMPSON, A. M., 2000 – *Atmospheric Sulfur Cycle Simulated in the Global Model GOCART: Model Description and Global Properties*. Journal of Geophysical Research, 105 (D20), pp. 24 671- 24 687.
42. CHRISTIE, M. A., 2002 – *Quantifying Uncertainty in Reservoir Performance Prediction*. Institute for Mathematics and its Applications. Mathematics in Geosciences. Web page sita em: <http://www.ima.umn.edu/geoscience/abstracts/1-7abs.html> (consultado em 2003).
43. CIVITA, M.; FORTI, O.; MARINI, P.; MICHELI, L.; PICCINI, L.; PRANZINI, G., – 1990. *Carta de la Vulnerabilità all’Inquinamento degli Acquiferi delle Alpi Apuane*. Mem. Explic. Monografia GNDCI. – CNR. n. 399, Firenze, pp. 56.
44. CIVITA, M. V., 1990 – *Le Carte della Vulnerabilità degli Acquiferi all Inquinamento: Teoria & Pratica*. Pitagora Editrice, Bologna.
45. CIVITA, M. V., De MAIO, M., 1997 – *Mapping Groundwater Vulnerability by the Point Count System Model SINTACS*. Groundwater Pollution: Managing Hydro-Geological Disasters in a vulnerable Environment, pp. 243-264.

46. CIVITA, M. V., De MAIO, M., 1998 – *Mapping Groundwater Vulnerability in Areas Impacted by Flash Flood Disasters*. 13th ESRI European User Conference. Web page em: <http://www.esri.com/library/userconf/europroc98/proc/idp51.html> (consultado em 2003), Firenze, October, pp.1-12.
47. COMISSÃO EUROPEIA, 1997 – *Sea Level Change and Coastal Processes: Implications for Europe – Research Results and Recommendations*. Conference Proceedings. Office for Official Publications of The European Communities, Louxembourg, pp. 247.
48. COMISSÃO PARA AS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS, 2001 – *Programa Nacional para as Alterações Climáticas, Versão 2001 para Discussão Pública*. Comissão para as Alterações Climáticas, pp. 176.
49. COTA, M. D., 2003 – *Contributo para a Identificação da Zona de Recarga de Alguns Aquíferos Superficiais do Quadrante Noroeste da Ilha Terceira, com Base em Traçadores Ambientais*. Mestrado em Gestão e Conservação da Natureza, Angra do Heroísmo, Universidade dos Açores, Departamento de Ciências Agrárias.
50. COUTINHO, R., 1990 – *Estudo Hidrogeológico do Maciço das Sete Cidades*. Lisboa, Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências, Departamento de Geologia, Tese de Mestrado, pp. 134.
51. COUTINHO, R., CARREIRA, P. M., ALMEIDA, C., MONGE, A. M., VIEIRA, M. C., CARVALHO, M. R., CRUZ, J. V., 1996 – *Estudo Isotópico dos Aquíferos do Maciço das Sete Cidades, S. Miguel – Resultados Preliminares*. Lisboa, Associação Portuguesa de Recursos Hídricos, Revista “Recursos Hídricos”, Vol. 17, N.º 2/3, pp. 25-32.
52. COUTINHO, R., 2000 – *Elementos para a Monitorização Sismovulcânica da Ilha do Faial (Açores): Caracterização Hidrogeológica e Avaliação de Anomalias de Rn Associadas a Fenómenos de Desgaseificação*. Tese de Doutoramento no Ramo de Geologia, Especialidade de Vulcanologia, Departamento de Geociências, Universidade dos Açores, Ponta Delgada.
53. CRAMER, W., DOERTY, R., HULME, M., VINER, D. (Ed.), 2000 – *Climate Scenarios for Agriculture, Forest and Ecosystem Impacts*. ECLAT-2 Workshop Report N.º 2, União Europeia, Climatic Research Unit UEA, Norwich, UK, pp. 119.
54. CRUZ, J. V., 1992 – *Hidrogeologia da Ilha de Santa Maria*. Lisboa, Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências, Departamento de Geologia, Tese de Mestrado, pp. 239.
55. CRUZ, J. V., 1997 – *Estudo Hidrogeológico da Ilha do Pico (Açores-Portugal)*. Tese de Doutoramento no ramo de Geologia, especialidade de Hidrogeologia, apresentada ao Departamento de Geociências da Universidade dos Açores. Universidade dos Açores, Ponta Delgada, pp. 433.

56. CRUZ, J. V., SILVA, M. O., 1999 – *Hidrogeoquímica da Água Subterrânea na Ilha do Pico (Açores-Portugal)*. Resumo alargado da comunicação apresentada ao Seminário “Águas Subterrâneas”, Lisboa, Associação Portuguesa de Recursos Hídricos, Dezembro 1999.
57. CUSTÓDIO, E., 1973 – *Planteamiento de Estudios Geohidrológicos en Pequeñas Zonas sin Datos Sistemáticos*. Simpósio de UNESCO sobre “Prevision de Recursos de Agua con Datos Inadecuados”. Madrid.
58. CUFFEY, K.M., MARSHALL, S. J., 2000 – *Substantial Contribution to Sea-Level Rise During the Last Interglacial from the Greenland Ice Sheet*. Letters to Nature, Nature, Vol. N° 404, Fasc. N° 6, pp. 591-594.
59. CUSTÓDIO, E., LLAMAS, M. R., 1983 – *Hidrología Subterránea*. Barcelona, Ed. Omega, Tomos I e II, pp. 2360.
60. DELGADO RODRIGUES, J., JORGE, C. R., 1990 – *Protecção das Nascentes e Captações da Ilha de São Miguel – Açores*. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Relatório LNEC 83/90 - NP, pp. 64.
61. DIAMANTINO, C., 1996 – *Intrusão Salina: Caracterização da Situação na Faixa Costeira de Portugal Continental e Aplicação de um Modelo Matemático a uma Região a Norte de Sines*. Informação Científica LNEC, HIDRÁULICA, ICT, INCH 6, 143 pp.
62. DIAMANTINO, C., LOBO-FERREIRA, J. P., 1996 – *Caracterização da Intrusão Salina na Faixa Costeira de Portugal Continental*. In "3º Congresso da Água e VII SILUBESA", em 25 a 29 de Março de 1996, organizado pela APRH e pela ABRH, em Lisboa, 10 pp.
63. DIAS, J. A., TABORDA, R. M., 1992 – *Tidal Gauge Data in Deducing Secular Trends of Relative Sea Level and Crustal Movements in Portugal*. Journal of Coastal Research, Vol. N.º 8, Fasc. N.º 3, pp 655-659.
64. DIAS, E., 1996 – *Vegetação Natural dos Açores*. Dissertação de Doutoramento, Angra do Heroísmo, Universidade dos Açores, Departamento de Ciências Agrárias.
65. DIAZ, A. A. A., FEBRILLET, J. H., 1986 – *Hydrology and Water Balance of Small Islands. A Review of Existing Knowledge*. Programa Hidrológico Internacional da UNESCO IHP – III Project 4.6. UNESCO, Paris, 25 pp.
66. DIERSCH, H.-J. G., 1998 – *Interactive, Graphics-based Finite-element Simulation System FEFLOW for Modelling Groundwater Flow, Contaminant Mass and Heat Transport Processes*. FEFLOW User’s Manual. WASY Ltd.
67. DOERFLIGER, N., ZWAHLEN, F., 1997 – *EPIK: A New Method for the Outlining of Protection Areas in Karstic Environment*. In: “Karst Warters and Environmental Impacts”, International Symposium and Field Seminar, Antalya, Turquia, Günay G & Johnson A.I. (Eds.), Balkema; Rotterdam, pp. 117-123.

68. DOUGLAS, B. C., 1991 – *Global Sea Level Rise*. Journal of Geophysics, Res., 96 (C4), pp. 6981-6992.
69. DOUGLAS, B. C., 1995 – *Global Sea Level Change: Determination and Interpretation*. US National Report to IUGG, 1991-1994, Revista Geophysics, Vol. 33, Supplement. American Geophysical Union.
70. DROTRH e IA, 2001 – *Plano Regional da Água dos Açores*. Relatório Técnico, Versão para Consulta Pública, pp. 414.
71. EMERY, K. O., AUBREY, D. G., 1985 – *Glacial Rebound and Relative Sea Levels in Europe from Tide-Gauge Records*. WHOI-R-85-012, Tectonophysics, Vol. 120, pp. 239-255.
72. EMILIANI, C, KRAUS, E. B., SHOEMAKER, E. M., 1981 – *Sudden Death at the End of the Mesozoic*. Earth and Planetary Science Letters, Vol. 55, pp. 317-334.
73. EPA, 1998 – *Climate Change and Hawaii*. EPA 236-F-98-007e, pp. 4.
74. EPPNA, 1998 – *Informação Cartográfica dos Planos de Bacia. Sistematização das Figuras e Cartas a Imprimir em Papel*. Equipa de Projecto do Plano Nacional da Água, versão de Outubro de 1998. Lisboa, INAG, pp. 29.
75. EVERTS, C. H., 1985 – *Sea Level Rise Effects on Shoreline Position*. Journal of Waterway, Port and Coastal Engineering, pp. 1305-1312.
76. FALKLAND, A., CUSTÓDIO, E., 1991 – *Hydrology and Water Resources of Small Islands: a Practical Guide*. Ed. A. Flakland, Publicação UNESCO, pp. 500.
77. FERNANDES, J. F., 2004 – *Caracterização Climática das Ilhas de São Miguel e Santa Maria, com Base no Modelo CIELO*. Relatório de Estágio da Licenciatura de Engenharia Agrícola, Angra do Heroísmo, Universidade dos Açores, Departamento de Ciências Agrárias.
78. FERREIRA, O., DIAS, J., TABORDA, R., (in press) – *Implications of Sea-Level Rise for Portugal*. pp. 19.
79. FONTES, J. C., PEREIRA, L. S., 2003 – *Quantificação e Simulação da Erosão Hídrica em Solos Vulcânicos: Relação com o Uso do Solo*. 6º SILUSBA: Simpósio de Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa, organizado pela APRH, Praia, Cabo Verde, pp. 399-411.
80. FORJAZ, V. H., 1989 – *Coastal Environment and S. Miguel Geothermal Wastes. Symposium on Applied and Environmental Geology*. VI Coastal Geological Environments. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.
81. FORJAZ, V. H., FERNANDES, N. S., 1975 – *Notícia Explicativa da Carta Geológica de Portugal, Escala 1:50 000, Ilha de S. Jorge – Folhas A e B (Açores)*. Lisboa, Serviços Geológicos de Portugal, pp. 32.

82. FOSTER, S. S. D., 1987 – *Fundamental Concepts in Aquifer Vulnerability, Pollution Risk and Protection Strategy*. In “Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollution, Proceedings and Information N.º 38 of the International Conference held in the Netherlands in 1987, TNO Committee on Hydrological Research”, W. van Duijvanbooden e H. G. van Waegeningh (Eds.), Delft, the Netherlands.
83. FRANCÉS, A., PARALTA, E., FERNANDES, J., RIBEIRO, L., 2001 – *Development and Application in the Alentejo Region of a Method to Assess the Vulnerability of Groundwater to Diffuse Agriculture Pollution: The Susceptibility Index*. Third International Conference of Future Groundwater resources at Risk, Lisboa, IST, Centro de Geosistemas.
84. FREER, J., BEVEN, K., AMBROISE, B., 1996 – *Bayesian Estimation of Uncertainty in Runoff Prediction and the Value of Data: an Application of the GLUE Approach*. Water Resources Research, N.º 32, pp. 2161-2173.
85. GAFFIN, S. R., 1997 – *Impacts of Sea Level Rise on Selected Coasts and Islands*. Environmental Defense Fund, pp. 34.
86. GLEIK, P., ADAMS, D. B., 2000 – *Potential Consequences of Water Variability and Change for the Water Resources of the United States*. Report of the Water Sector Assessment Team of the National Assessment of the Potential Consequences and Variability and Change for the US Global Change Research Program, US Geological Survey, Chapter 14.
87. GASPAR, J. L., QUEIROZ, G., 1995 – *Carta Vulcanológica dos Açores – Ilha Graciosa, Escala 1:10 000*. Ponta Delgada, Universidade dos Açores, Câmara Municipal de Santa Cruz da Graciosa.
88. GOMMES, R., DU GUERNY, J., NACHTERGAELE, F., e BRINKMAN, R., 1998 – *Potential Impacts of Sea-level Rise on Populations and Agriculture*. FAO, SD Dimensions. Web page: <http://www.fao.org/sd/eidirect/EIre0047.htm> (consultado em 2002).
89. GOGU, R., DASSARGUES, A., 2000 – *Sensitivity Analysis for the EPIK Vulnerability Assessment in a Local Karstic Aquifer*. Hydrogeology Journal, v. 8, nº3, pp. 337-345.
90. GRINGARTEN, E., DEUTSCH, C. V., 1999 – *Methodology for Variogram Interpretation and Modeling for Improved Reservoir Characterization*. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Texas, 3 – 6 Outubro, pp.13.
91. HANSEN, J., 2000 – *Global Warming in the 21st Century: an Alternate Scenario*. Proceedings of the National Academy of Sciences.
92. HARASAWA, H., 2000 – *Recent Development of Impacts Study in Japan and IPCC*. National Institute for Environmental Studies, Environment Agency of Japan, pp. 12.

93. HARRISON, P. A., BERRY, P. M., DAWSON, T. P. (Eds.), 2001 – *Climate Change and Nature Conservation in Britain and Ireland: Modelling Natural Resource Responses to Climate Change (the MONARCH project): Technical Report*. UKCIP. Web page: http://www.ukcip.org.uk/sectoral_pubs/sectoral.html (consultado em 2004).
94. HARVEY, L. D. D., 1994 – *Transient Temperature and Sea Level Response of Two-Dimensional Ocean-Climate Model to Greenhouse Gas Increases*. Journal of Geophysical Research, Vol. N.º 99, Fasc. N.º 18, pp. 447-466.
95. HAY, J. E. 1997 – *A Pacific Response to Climate Change*. Tiempo, 23, pp. 1-10.
96. HAY, J. E., 2000 – *Climate Change and Small Island States: A Popular Summary of Science-Based Findings and Perspectives*. Paper presented at the 2nd Alliance of Small Island States (AOSIS) Workshop on Climate Change Negotiations, Management and Strategy, 26 July-4 August, Apia, Samoa.
97. HAY, J. E., KALUWIN, C., 1993 – *Climate Change and Sea Level Rise in the South Pacific Region. Proceedings of the Second SPREP Meeting*. Nomea, 6–10 April 1992, South Pacific Regional Environment Programme, Apia, Western Samoa, 238 pp.
98. HOBBS, B. F., 1997 – *Bayesian Methods for Analysing Climate Change and Water Resource Uncertainties*. Journal of Environmental Management, N.º 49, pp. 53-72.
99. HOLMAN, I. P., LOVELAND, P. J. (Eds.), 2002 – *REGIS: Regional Climate Change Impact Response Studies in East Anglia and North West England*. Technical Report. UK Climate Impacts Program. Web page sita em: http://www.ukcip.org.uk/sectoral_pubs/sectoral.html (consultado em 2004).
100. HOLMAN, I. P., LOVELAND, P. J., NAJARRO, P., 2001 – *Integrated Impacts on Water. Regional Climate Change Impact Response Studies*. MAFF Project N.º CC 0337, pp. 152-190.
101. HOLLIS, J. M., BROWN, C. D., 1996 – *A Catchment-Scale Model for Pesticides in Surface Water*. In: *The Environmental Fate of Xenobiotics*, Eds. Del Re, A. A. M., Capri, E., Evan, S. P., Trevisan, M., Proceedings of the X Symposium on Pesticide Chemistry, Piacenzo, Itália, pp. 371-379.
102. HOOZEMANS, F. M. J., MARCHAND, M., PENNEKAMP, H. A., 1993 – *A Global Vulnerability Analysis, Vulnerability Assessments for Population, Coastal Wetlands and Rice production on a Global Scale*. 2nd Edition, Delft Hydraulics and Rijkswaterstaat, Delft and the Hague.
103. HOOZEMANS, F. M. J., HULSBERGEN, C. H., 1995 – *Sea-Level Rise: A World Wide Assessment of Risk and Protection Costs*. In: Eisma, D. (Ed.), *Climate Change: Impact on Coastal Habitation*. Lewis Publishers, London, pp. 137-163.

104. HULME, M., VINER, D., 1999 – *Representing Uncertainty in Climate Change Scenarios and Impact Studies*. ECLAT-2, Workshop report N.º 1, Climatic Research Unit, UEA, Norwich, UK, Ed. Carter T., Hulme, M., Viner, D., pp. 129.
105. INMG, 1988 a) – *Anuário Climatológico de Portugal. Volume XXXV – Ano de 1981, I Parte – Observações de Superfície, Fascículo B-Açores*. Lisboa, Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica, pp. 48.
106. INMG, 1988 b) – *Anuário Climatológico de Portugal. Volume XXXVII – Ano de 1983, I Parte – Observações de Superfície, Fascículo B-Açores*. Lisboa, Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica, pp. 46.
107. INMG, 1989 a) – *Anuário Climatológico de Portugal. Volume XXXVI – Ano de 1982, I Parte – Observações de Superfície, Fascículo B-Açores*. Lisboa, Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica, pp. 48.
108. INMG, 1989 b) – *Anuário Climatológico de Portugal. Volume XXXVIII – Ano de 1984, I Parte – Observações de Superfície, Fascículo B-Açores*. Lisboa, Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica, pp. 48.
109. INMG, 1989 c) – *Anuário Climatológico de Portugal. Volume XXXIX – Ano de 1985, I Parte – Observações de Superfície, Fascículo B-Açores*. Lisboa, Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica, pp. 48.
110. INSTITUTO HIDROGRÁFICO, 2002 – *Tabela de Marés 2003. Volume I*. Ministério da Defesa Nacional, Marinha.
111. IPCC, 1995 – *IPCC Second Assessment: Climate Change 1995: A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 64.
112. IPCC, 2001 a) – *Summary for Policymakers. Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability. A Report of Working Group II of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Web Page: <http://www.ipcc.ch> (consultado em 2002).
113. IPCC, 2001 b) – *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Summary for Policymakers and Technical Summary of the Working Group II Report*. Intergovernmental Panel on the Climate Change, UNEP, WMO, pp. 88.
114. IPCC, 2002 – *Climate Change and Biodiversity. IPCC Technical Report Paper V*. Abril, 2002, pp. 77.
115. JACOBS, K., ADAMS, D. B., GLEIK, P., 2000 – *Potential Consequences of Climate Variability and Change for the Water Resources of the United States. Chapter 14*. US Global Change Research Program, US National Assessment of the Potential Consequences of Climate Variability and Change, Sector: Water Resources, <http://www.usgcrp.gov/usgcrp/nacc/water/default.htm> (consultado em 2003 e 2004), pp. 405-435.

116. JOURNAL, A. G., HUIJBREGTS, C. J., 1989 – *Mining Geostatistics*. Academic Press, pp. 600.
117. JULIANO, M. M., 2003 – *Determinação e Análise do Sistema de Circulação Oceânica Tridimensional e Clima do Oceano Atlântico: Uma Visão Integrada*. Universidade dos Açores, Tese de Doutoramento.
118. KALY, U., BRIGUGLIO, L., McLEOD, H., SCHMALL, S., PRATT, C., PAL, R., 1999 a) – *Environmental Vulnerability Index (EVI) to Summarise National Environmental Vulnerability Profiles*. SOPAC Technical Report 275, SOPAC, February.
119. KALY, U., BRIGUGLIO, L., McLEOD, H., SCHMALL, S., PRATT, C., PAL, R., 1999 b) – *Report on the Environmental Vulnerability Index (EVI) Think Tank, 7-10 September 1999 Pacific Harbour, Fiji*. SOPAC Technical Report 299, SOPAC, UNEP, October.
120. KALY, U., PRATT, C., 2000 – *Environmental Vulnerability Index: Development and Provisional Indices and Profiles for Fiji, Samoa, Tuvalu and Vanuatu. EVI Phase II Report*. SOPAC Technical Report 306. SOPAC, February.
121. KAMPHUIS, J. W., 1990 – *Influence of Sand or Gravel on the Erosion of Cohesive Sediment*. Journal of Hydraulic Research, Vol. N.º 28, n.º 1, pp. 34-53
122. KARL, T. R., KNIGHT, R. W., BAKER, B., 2000 – *The Record Breaking Global Temperature of 1997 and 1998: Evidence for an Increase in the Rate of Global Warming?*. Geophysical Research Letters, N.º 27, pp. 719-722.
123. KARST TASK FORCE, 2001 – *Karst Inventory Standards and Vulnerability Assessment Procedures for British Columbia*. Prepared by the Karst Task Force for the Resources Inventory Committee, Version 1, Janeiro 2001, pp. 112.
124. KATZ, R. W., 2001 – *Techniques for Estimating Uncertainty in Climate Change Scenarios and Impact Studies*. National Center for Atmospheric Research, pp. 63.
125. KELLER, C. K., VAN DER KAMP, G., CHERRY, J. A., 1988 – *Hydrogeology of Two Sasakatchewan Tills, Fractures, Bulk Permeability and Spatial Vulnerability of Downward Flow*. Journal of Hydrogeology, N.º 101, pp. 97-121.
126. KIMURA, Y., 1997 – *Evaluating Migration Potential of Contaminants Through Unsaturated Subsurface in Texas Vulnerability Map*. Web page sita em: <http://www.ce.texas.edu/prof/maidment/tmpaper/spring97/kimuray/gis/vulnerability.html> (consultado em 2003 e 2004).
127. KRUSEMAN, G. P., DE RIDDER, N. A., 1990 – *Analysis and Evaluation of Pumping Test data*. International Institute for Land Reclamation and Improvement. Publication N.º 47, 2nd ed., Wageningen, The Netherlands.
128. LENCASTRE, A., FRANCO, F. M., 1984 – *Lições de Hidrologia*. Universidade Nova de Lisboa, 451 pp.

129. LINGE, C., 1985 – *Estimate of West Antarctic Contribution to Observed Sea Level Rise*. Solicited submission and comment on Chapter 9 of Draft IPCC 1990.
130. LLOYD, E. F., COLLIS, S. K., 1981 – *Geothermal Prospection – Ilha Terceira, Açores. Geological Report*. Ponta Delgada, Secretaria Regional do Comércio e Indústria, pp. 96.
131. LOBO, M. A., 1991 – *Nitratos na Água de Consumo na Região Autónoma dos Açores*. 1.^{as} Jornadas Atlânticas de Protecção do Meio Ambiente, Angra do Heroísmo, pp. 386-391.
132. LOBO, M. A., 1993 – *Contribuição para o Estudo Físico-Químico e Microbacteriológico da Água para Consumo Humano do Arquipélago dos Açores*. Dissertação de Doutoramento. Terra Chã, Universidade dos Açores, Departamento de Ciências Agrárias.
133. LOBO, M. A., RODRIGUES, A. F., RODRIGUES, F. C., 2002 – *Vulnerabilidade de los Acuíferos de una Isla Volcánica de Reducida Dimension: El Ejemplo de la Isla del Corvo em las Azores*. In Moral, L. del (2002) ed., III Congreso Ibérico sobre Gestión y Planificación del Agua “La Directiva Marco del Agua, Realidades y Futuros”, Sevilla, I.S.B.N. 84-930817-3-7.
134. LOBO FERREIRA, J. P. C., 1981 – *Mathematical Model for the Evaluation of the Recharge of Aquifers in Semiarid Regions with Scarce Hydrogeological Data*. Rotterdam, Proceedings of Euromech 143/Delft/2-September 1981, in "Flow and Transport in Porous Media", Ed. A. Verruijt, pp. 101-107.
135. LOBO FERREIRA, J. P. C., 1982 – *Mathematical Model for the Evaluation of the Recharge of Aquifers in Semiarid Regions with Scarce Hydrogeological Data*. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Memória LNEC n.º 582.
136. LOBO FERREIRA, J. P. C., RODRIGUES, J. D., 1988 – *BALSEQ: A Model for the Estimation of Water Balances, Including Aquifer Recharge, Requiring Scarce Hydrologic Data*. in "Estimation of Natural Groundwater Recharge", Ed. I. Simmers, NATO ASI Series, Serie C: Vol. 222, D. Reidel Publ. Comp., Dordrecht.
137. LOBO FERREIRA, J. P., CABRAL, M., 1991 – *Proposal for an Operational Definition of Vulnerability for the European Community's Atlas of Groundwater Resources*, in the framework of the Meeting of the "European Institute for Water, Groundwater Work Group Brussels, Feb. 1991".
138. LOBO FERREIRA, J. P., 1991 – *Plano para a Gestão Integrada dos Recursos Hídricos da Ilha de S. Miguel – Açores: Avaliação da Recarga dos Acuíferos da Ilha de S. Miguel*. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Relatório LNEC 239/91 - GIAS, pp. 86.

139. LOBO FERREIRA, J. P., 2000 – *Inventariando, Monitorizando e Gerindo de Forma Sustentável Recursos Hídricos Subterrâneos. A Situação Portuguesa, os Desafios da União Europeia e a Globalização*. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Teses e Programas de Investigação N.º 14, pp. 431.
140. LOBO FERREIRA, J. P., CHACHADI, A. G., DIAMANTINO, C., HENRIQUES, M. J., 2005 – *Assessing Aquifer Vulnerability to Sea-Water Intrusion Using GALDIT Method: Part 1 – Application to the Portuguese Aquifer of Monte Gordo*. Proceedings of the 4th Inter Celtic Colloquim on Hydrogeology and Management of Water Resources, Univerisdade do Minho, Guimarães, Portugal, Julho, 11-13, pp. 12.
141. LOPES, M. E., 1970 – *A Ilha de S. Jorge do Arquipélago dos Açores. Contribuição para o Estudo da sua Morfologia e Actividade Vulcânica*. Lourenço Marques/Maputo, Universidade de Lourenço Marques, Separata da Revista “Ciências do Homem”, Vol. III, Série A, pp. 107.
142. LOVELAND, P. J., ROUNSEVELL, M. D. A., MAYR, T. R., LEGROS, J.-P., VOLTZ, M., DE LA ROSA, D., ARMSTRONG, A. C., 1993 – *ACCESS: AgroClimatic Change and European Soil Suitability; A Spatially Distributed Model*. In: *Climate Change and Impacts*, I. Troen, ed., EUR 15 921 EN, pp. 215-228
143. MACHADO, F., FREIRE, T., 1976 – *Erosão Marinha no Cone Vulcânico dos Capelinhos*. Atlântida, Vol. XX, pp. 206-209.
144. MACHADO, F., FREIRE, T., 1985 – *Cone dos Capelinhos em 1981*. Açoreana, Vol. 6, Fasc. N.º 3, pp. 261-266.
145. MADEIRA, J., 1986 – *Geologia Estrutural e Enquadramento Geotectónico da Ilha de Santa Maria (Açores)*. Dissertação das Provas de Aptidão Científica e Pedagógica. Lisboa, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Departamento de Geologia, pp. 107.
146. MARSHALL, S. J., CUFFEY, K. M., 2000 – *Peregrinations of the Greenland Ice Sheet Divide in the Last Glacial Cycle: Implications for the Central Greenland Ice Cores*. Earth and Planetary Science Letters, Vol. N.º 179, pp. 73-90.
147. McLEOD, K., CONNER, W., 1996 – *Rising Sea Level Making Conditions Tougher for Survival of Forested Coastal Wetlands*. Web page sita em: <http://www.uga.edu/srel/searise.html> (consultado em 2001).
148. MELO, T. F., 2005 – *Monitorização das Águas Subterrâneas e Superficiais da Ilha Terceira no Âmbito do Projecto Geotérmico da Terceira (PGT): Fase de Abertura dos Furos Geotérmicos*. Relatório de Estágio da Licenciatura em Engenharia do Ambiente. Angra do Heroísmo, Universidade dos Açores, Departamento de Ciências Agrárias, pp. 51.
149. MENDONÇA, J. L., 1993 – *Condições Hidrogeológicas e Recursos Hídricos Subterrâneos do Arquipélago dos Açores*. Angra do Heroísmo, Seminário “Recursos Hídricos e o Ambiente na Região Autónoma dos Açores”.

150. MENEZES, J. G., 1993 – *Hidrologia e Hidrogeologia da Ilha Terceira: Grandes Condicionantes*. Angra do Heroísmo, Seminário “Recursos Hídricos e Ambiente na Região Autónoma dos Açores”, pp. 56.
151. METEOROLOGICAL OFFICE, 1999 – *Climate Change and its Impacts. Stabilization of CO₂ in the Atmosphere*. The Met. Office, DETR. Web page sita em: http://www.met-office.gov.uk/sec5/CR_div/CoP5 (consultado em 2004).
152. MIRANDA, P. M. A., VALENTE, M. A., TOMÉ, A. R., TRIGO, R., COELHO, M. F., AGUIAR, A., AZEVEDO, E. B., 2005 – *O Clima em Portugal nos Séculos XX e XXI*. In Impactos das Alterações Climáticas em Portugal – Projecto SIAM: Fase 2. pp. 89.
153. MITCHELL, J., COGHLAN, C., JONES, T., RAYNER, T., GREGORY, J., LOWE, J., PARKER, D., GORDON, M., JENKINS, G., HULME, D., VINER, D., JONES, P., 1999 – *Observations and Predictions of Climate Change*. Hadley Centre & Climatic Research Unit of the University of East Anglia. Web page em: http://www.metoffice.gov.uk/sec5/CRdiv/pubs/brochures/B1999/obs_pred_clim_change.html (consultado em 2004 e 2005), pp. 7.
154. MORANG, A., POPE, J., EDS., 2000 – *Coastal Engineering Manual Outline*. <http://bigfoot.wes.army.mil/cem026.html> (consultado em 2001 e 2002).
155. NASA, 2000 a) – *Culprits of Climate Change*. http://science.nasa.gov/headlines/y2000/ast29aug_1.html (consultado em 2005), pp. 3.
156. NASA, 2000 b) – *Retreat of the West Antarctic Ice Sheet*. http://science.nasa.gov/headlines/y2000/ast_27dec_1.html (consultado em 2005), pp. 3.
157. NATIONAL ASSESSMENT SYNTESYS TEAM, 2000 a) – *Climate Change Impacts on the United States: The Potential Consequences of Climate Variability and Change*. US Global Change Research Program. Web page sita em: <http://www.usgcrp.gov/usgcrp/Library/nationalassessment/overviewislands.htm> (consultado em 2003), pp. 8.
158. NATIONAL ASSESSMENT SYNTESYS TEAM, 2000 b) – *Water: The Potential Consequences of Climate Variability and Change for the Water Resources of the United States*. The Report of the Water Sector Assessment Team of the National Assessment of the Potential Consequences and Variability and Change for the US Global Change Research Program, US Geological Survey, September. Web page: <http://www.usgcrp.gov/usgcrp/nacc/water/default.htm> (consultado em 2003), pp. 151.
159. NICHOLLS, R. J., 1994 – *Synthesis of Vulnerability Analysis Studies*. Proceedings of WORLD COAST '93, Rijkswaterstaat, August, pp. 1-41.
160. NICHOLLS, R., 1997 – *The Impacts of Sea-level Rise on Coastal Areas*. Web page sita em: <http://www.metoffice.gov.uk/research/hadleycentre/pubs/brochures/B1997/sealevel.htm> (consultado em 2002), pp. 5.

161. NICHOLLS, R. J., 1998 – *Coastal Vulnerability Assessment for Sea-Level Rise: Evaluation and Selection of Methodologies for Implementation. Technical Report TR 98002*. Caribbean Planning for Adaptation to Global Climate Change (CPACC) Project. Component 6: Coastal Vulnerability and Risk Assessment. November, pp. 39.
162. NICHOLLS, R., 1999 – *Climate Change and Its Impacts: Stabilization of CO₂ in the Atmosphere*. Web page sita em: http://www.meto.govt.uk/sec5/CR_div/pubs/brochures/B1999/contents.html (consultado em 2001).
163. NICHOLLS, R. J., LA VEGA-LEINERT, A. C., 2002 – *Synthesis and Upscaling of Sea-Level Rise Vulnerability Assessment Studies (SURVAS) – SURVAS Methodology*. January, <http://www.survas.mdx.ac.uk> (consultado em 2002), pp. 21.
164. NOAA, 1998 a) – *User's Guide for 8200 Acoustic Gauge (Installation and Operation)*. Prepared by: Requirements and Engineering Branch Oceanographic Products and Services Division, pp. 72.
165. NOAA, 1998 b) – *User's Guide for 8200 Bubbler Gauge (Installation and Operation)*. Prepared by: Requirements and Engineering Branch Oceanographic Products and Services Division, pp. 30.
166. NOAA, 2001 – *User's Guide for 8210 Bubbler Water Level Gauge for Hydrographic Surveying Applications (Installation and Operation)*. Prepared by: Pacific Regional Office of Field Operations Division and Requirements and Development Division of Center for Operational Oceanographic Products and Services, National Ocean Service, pp. 21.
167. NORONHA, L., LOURENÇO, L., LOBO FERREIRA, J. P., LLEOPART, A., FEOLI, E., SAWKAR, K., CHACHADI, A., 2002 – *Coastal Tourism, Environment and Sustainable Local Development*. Tata Energy Research Institute, Universidade Nova de Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Instituto Cartografic de Catalunya, Universita degli Studi di Trieste, National Institute of Oceanography, Goa University. TERI, pp. 47.
168. NOVO, M. E., RODRIGUES, F. C., LOBO FERREIRA, J. P., AZEVEDO, E. B., 1997 – *Estudo Hidrogeológico das Nascentes do Cabrito (Ilha Terceira – Açores)*. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Relatório LNEC 89/97 - GIAS, pp. 124.
169. NOVO, M. E., RODRIGUES, F. C., LOBO FERREIRA, J. P., AZEVEDO, E. B., 2001 – *Desenvolvimento de um Inventário das Águas Subterrâneas dos Açores – Relatório Final – 3º Ano, Fase 3*. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Relatório LNEC 239/01 - GIAS, pp. 640.

170. 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*. Comunicação apresentada ao Seminário “Águas Subterrâneas”, Lisboa, 10 a 12 de Dezembro 1997, Associação Portuguesa de Recursos Hídricos, pp. 13.
171. OLIVEIRA, M. M., 2004 – *Recarga de Águas Subterrâneas: Métodos de Avaliação*. Doutoramento em Geologia (Hidrogeologia), Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências, Departamento de Geologia, pp. 440.
172. OLIVEIRA, M. M., MOINANTE, M. J., LOBO FERREIRA, J. P., 1997 – *Determinação da Recarga de Águas Subterrâneas a Partir da Análise de Hidrogramas de Escoamento*. Comunicação apresentada ao Seminário “Águas Subterrâneas”, Lisboa, 10 a 12 de Dezembro 1997, Associação Portuguesa de Recursos Hídricos, pp. 14.
173. OLIVEIRA, M. R., MARCÃO, A., 2001 – *Plano Regional da Água: Balanço Disponibilidades-Necessidades*. Versão 1.2. Região Autónoma dos Açores, Secretaria Regional do Ambiente, Direcção Regional do Ordenamento do Território e Recursos Hídricos, Ponta Delgada, Açores, pp. 42.
174. OLIVER, D. S., 2002 – *Assessing Uncertainty in Reservoir Prediction by Monte Carlo Methods*. Institute for Mathematics and its Applications. Mathematics in Geosciences. Web page site em: <http://www.ima.umn.edu/geoscience/abstracts/1-7abs.html> (consultado em 2001).
175. PARADELA, P. L., 1978 – *Hidrogeologia Geral dos Açores*. Lisboa, Direcção Geral do Saneamento Básico.
176. PARADELA, P. L., 1980 – *Hidrogeologia Geral das Ilhas Adjacentes*. Lisboa, Serviços Geológicos de Portugal, Comunicações dos Serviços Geológicos de Portugal, tomo 66, pp. 241-256.
177. PARADELA, P. L., 1982 – *Captação de Água Subterrânea nos Açores*. Seminário n.º 258 “Problemas de Recursos Hídricos em Ilhas e Zonas Costeiras”, Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, pp. 407-435.
178. PEREIRA, L. M., 2000 – *Hidrogeologia da Ilha de S. Jorge: uma Primeira Abordagem*. Relatório de Estágio da Licenciatura em Engenharia do Ambiente. Angra do Heroísmo, Universidade dos Açores, Departamento de Ciências Agrárias, pp. 51.
179. PERRY, M. (Ed.), 2000 – *Assessment and Potential Effects and Climate Change in Europe. Summary and Conclusions: The Europe Acacia Project*. Jackson Environment Institute, University of East Anglia, European Commission, pp. 17.
180. PINHEIRO, A. M., 2001 – *Análise de Dados Meteorológicos Diários: Definição de Estações para a Ilha Terceira (Açores)*. Relatório de Estágio da Licenciatura de Engenharia Agrícola, Angra do Heroísmo, Universidade dos Açores, Departamento de Ciências Agrárias.

181. PLANTON, S., HANSON, C., VINER, D., HEPFFNER, M. (Ed.), 2001 – *Applying Climate Scenarios for Regional Studies: with Particular Reference to the Mediterranean*. ECLAT-2 Workshop Report N.º 4, União Europeia, Climatic Research Unit UEA, Norwich, UK, pp. 96.
182. POETER, E. P., MCKENNA, S. A., 1995 – *Reducing Uncertainty Associated with Ground-Water Flow and Transport Predictions*. Groundwater, Vol. 33, N.º 6, pp. 10.
183. PRATT, C., KOSHY, R., KALY, U., PAL, R., SALE-MARNIO, E., 2001 – *Progress Report: Environmental Vulnerability Index (EVI) Project – Progress Towards a Global EVI*. SOPAC Miscellaneous Report 405. SOPAC, March.
184. PUGH, D. T., 1987 – *Tides, Surges, and Mean Sea Level*. John Wiley and Sons.
185. QUADROS, S., 2002 – *Contribuição para o Estudo da Aplicação de Tarifas de Saneamento Básico*. Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Dissertação de Mestrado.
186. ROCHA, F., ROCHA, J. S., LOBO FERREIRA, J. P., DELGADO RODRIGUES, J., JORGE, C. R., 1991 – *Plano para a Gestão dos Recursos Hídricos da Ilha de S. Miguel - Açores. 1.º Relatório: Caracterização Geral da Ilha de S. Miguel*. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Relatório 118/91 - NHHF/NP, pp. 117.
187. RODRIGUES, A. F., LOBO, M. A., REGO, S., 2002 – *Acidez da Precipitação da Ilha Terceira – Açores: Possíveis Efeitos na Cryptomeria Japonica da Ilha*. 6º Congresso da Água “A Água é d’Ouro – Ameaças, Segurança e Soluções”, 18 a 22 de Março, organizado pela APRH e pela ABRH, Porto, pp. 10.
188. RODRIGUES, A. F., 2001 a) – *A Atmosfera dos Açores no Contexto das Mudanças Globais: Estado Actual*. Edição da Direcção Regional do Ambiente dos Açores – Direcção dos Serviços de Promoção Ambiental, Angra do Heroísmo, pp. 34.
189. RODRIGUES, A. F., 2001 b) – *Aerossóis Atmosféricos com Efeitos no Clima: Níveis e Processos de Transformação no Centro do Atlântico Norte (Região Açores)*. Angra do Heroísmo, Universidade dos Açores, Departamento de Ciências Agrárias, Tese de Doutoramento.
190. RODRIGUES, A. F., FREITAS, M. C., VIEIRA, B., SOARES, P., SOUSA, E., AMARAL, A. S., RODRIGUES, C., APTROOT, A., 2004 – *Mercury on the Eastern Flanks of the Mid-Atlantic Ridge (Azores Region)*. EMZ-Materials and Geoenvironment, Vol. 51, N.º 2, pp. 1 336-1 339.
191. RODRIGUES, C. M., 2002 b) – *Recursos Hídricos e Património Natural: Aplicação de uma Metodologia de Suporte ao Ordenamento do Sítio de Interesse Comunitário da Zona do Complexo Central da Ilha Terceira*. Angra do Heroísmo, Universidade dos Açores, Tese de Mestrado em Gestão e Conservação da Natureza.

192. RODRIGUES, F. C., 1993 – *Hidrogeologia da Ilha Terceira: Contributo para o seu Conhecimento*. Angra do Heroísmo, Universidade dos Açores, Departamento de Ciências Agrárias, Tese de Mestrado, pp. 139.
193. RODRIGUES, F. C., 2002 a) – *Hidrogeologia da Ilha Terceira (Açores – Portugal)*. Angra do Heroísmo, Universidade dos Açores, Departamento de Ciências Agrárias, Tese de Doutoramento.
194. RODRIGUES, F. C., RODRIGUES, A. F., AZEVEDO, E. M. V., 1999 – *Distribution of Chlorid Contents in Precipitation Over a Small Oceanic Island*. European Society for Soil Conservation, 20 Setembro a 6 Novembro, Angra do Heroísmo.
195. RODRIGUES, F. C., RODRIGUES, A. F., 2001 – *Fingerprint of North Atlantic Cyclonic Activity by Deuterium and Oxigen-18 of Water Vapour*. Abstracts de Challenges of a Changing Earth: Global Change Open Science Conference IGAC, 10 – 13 July, Amsterdam, Netherlands.
196. RODRIGUES, F. C., RODRIGUES, A. F., 2003 – *Distribution of Environmental Isotopes in Precipitation on a Small Oceanic Island (Terceira – Azores): Some Particularities Based on Preliminary Results*. Arquipélago: Agrarian Science and Environment, 1, pp. 35-40.
197. RODRIGUES, R. J., 1995 – *Hidrologia de Ilhas Vulcânicas*. Tese de Especialista. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I&D – Tese Hidráulica, pp. 397.
198. ROSENZWEIG, C., HILLEL, D., 1995 – *Potential Impacts of Climate Change on Agriculture and Food Supply. Consequences, The Nature and Implications of Environmental Changes*. Vol. 1, N.º 2, pp. 12. Web page sita em: <http://www.gcrio.org/CONSEQUENCES/summer95/agriculture.html> (consultado em 2001).
199. ROUNSEVELL, M. D. A., LOVELAND, P. J., MAYR, T. R., ARMSTRONG, A. C., DE LA ROSA, D., LEGROS, J.-P., SIMOTA, C., SOBEKUZ, H., 1996 – *ACCESS: A Spatially-Distributed Soil Water and Crop Development Model for Climate Change Research*. In: *Implications of Global Environmental Change for Crops in Europe*. R.J. Froud-Williams, R. Harrington, T. J. Hocking, H. G. Smith, T. H. Thomas, eds., *Aspects of Applied Biology*, N.º 45, pp. 85-92.
200. RUTLEDGE, A. T., DANIEL, C. C., 1994 – *Testing and Automated Method to Estimate Ground-water Recharge from Streamflow Records*. *Ground Water*, 32 (2), pp. 180-189.
201. SANCHEZ-ARCILLA, A., HOEKSTRA, P., JIMÉNEZ, J. A., KAAS, E., MALDONADO, A., 1997 – *Sea Level Changes and Coastal Processes Implications for Europe, Research Results and Recommendations*. Conference Proceedings. European Commission, EUR 19887, pp. 173-213.

202. SANTOS, F. D., VALENTE, M. A., MIRANDA, P. M. A., AGUIAR, A., AZEVEDO, E. B., TOMÉ, A. R., COELHO, F., 2004 – *Climate Change Scenarios in the Azores and Madeira Islands*. World Resource Review, Vol. N.º 16, N.º 4, pp. 473-491.
203. SANTOS, H. J. A., 1985 – *Alguns Aspectos da Erosão na Ilha de S. Miguel. O Caso Especial das Bacias Hidrográficas da Ribeira Grande e da Ribeira da Salga*. Açores, DGRF/SRAP.
204. SCHNEIDER, S. H., 2004 – *Abrupt Non-Linear Climate Change, Irreversibility and Surprise*. Global Environmental Change, Vol. 14, pp. 245-258.
205. SEAR, C., HULME, M., ADGER, N., BROWN, K., 2001 – *The Impacts of Global Climate Change on the UK Overseas Territories. Issues and Recommendations: A Summary Report*. Natural Resources Institute, Tyndall Centre for Climate Change Research, pp. 10.
206. SELF, F., 1986 – *The Recent Volcanology of Terceira, Azores*. London, J. Geology, Vol. 32, pp. 645-666.
207. SELF, F., GUNN, B., 1976 – *Petrology, Volume and Age Relations of Alkaline and Saturated Peralkaline Volcanics from Terceira, Azores*. Contributions on Mineralogy and Petrology, s.n., Vol. 54, Fasc. 4, pp. 293-313.
208. SERRALHEIRO, A., FORJAZ, V. H., ALVES, C. M., RODRIGUES, B., 1987 – *Carta Vulcanológica dos Açores – Ilha de Santa Maria, Escala 1:15 000, folhas 1 e 2*. Ponta Delgada, Serviço Regional de Protecção Civil, Universidade dos Açores-Centro de Vulcanologia, Instituto Nacional de Investigação Científica.
209. SERRALHEIRO, A., FORJAZ, V. H., ALVES, C. M., RODRIGUES, B., 1989 – *Carta Vulcanológica dos Açores – Ilha do Faial, Escala 1:15 000, Folhas 1, 2, 3 e 4*. Ponta Delgada, Serviço Regional de Protecção Civil, Universidade dos Açores-Centro de Vulcanologia.
210. SERRALHEIRO, A., MADEIRA, J., 1990 – *Stratigraphy and Geochronology of Santa Maria Island (Azores)*. Livro de Homenagem ao Prof. Dr. Carlos Romariz, Lisboa, Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências, Departamento de Geologia, pp. 357-376.
211. SHERMAN, R., 1998 – *Climate Change and Freshwater Resources*. Web page site em: <http://www.globesa.org/ccandwaterlecture.htm> (consultado em 2003).
212. SIAM, 2001 – *Climate Change in Portugal: Scenarios, Impacts and Adaptation Measures; Executive Summary and Conclusions*. Ed. F.D. Santos, K. Forbes e R. Moita. FCT, Fundação Calouste Gulbenkian e Gradiva, pp. 24.
213. SIAM, 2002 – *Climate Change in Portugal: Scenarios, Impacts and Adaptation Measures; SIAM Project (full report)*. Ed. F.D. Santos, K. Forbes e R. Moita. FCT, Fundação Calouste Gulbenkian e Gradiva, pp. 454.

214. SIAM, 2005 – *O Clima de Portugal nos Séculos XX e XXI. Projecto SIAM - Fase 2*. Relatório do Projecto SIAM, Instituto do Ambiente.
215. SILVA, I. M., 2003 – *Caracterização Climática das Ilhas Graciosa e S. Jorge, com Base no Modelo CIELO*. Relatório de Estágio da Licenciatura de Engenharia do Ambiente, Angra do Heroísmo, Universidade dos Açores, Departamento de Ciências Agrárias.
216. SINCLAIR, J., 1999 – *The Fifth Session of the UNFCCC, Conference of the Parties Report*. Web page sita em: <http://www.sidsnet.org/COP5sprep.html> (consultado em 2001), pp. 8.
217. SINGER, F., 1999 – *Global Warming, Will Lower Sea Level Rise: but Will Politicians Listen?*. Web page: <http://www.sepp.org/NewSEPP/sealevel.html> (consultado em 2002), pp. 2.
218. SHIRMOHAMMADI, A., KNISEL, W. G., SHERIDAN, J. M., 1984 - *An Approximate Method for Partitioning Daily Streamflow Data*. Journal of Hydrology, 74, pp. 335-354.
219. SOARES, AMÍLCAR, 2000 – *Geostatística para as Ciências da Terra e do Ambiente*. Lisboa, IST, Colecção Ensino da Ciência e da Tecnologia, pp. 214.
220. STURGES, W. E., 1987 – *Large-Scale Coherence of Sea Level at Very Low Frequencies*. Journal of Physical Oceanography, Vol. N.º 17, pp. 2084-2094.
221. SUNAMURA, T., 1992 – *Geomorphology of Rocky Coasts*. Wiley, New York, pp. 302.
222. SURVAS, 2000 – *Sea Level Rise Impacts and Adaptation in the Coastal Zone*. Web page sita em: <http://www.survas.mdx.ac.uk/content.htm> (consultado em 2002), pp. 13.
223. TABORDA, R., DIAS, A., 1988 a) – *O Nível do Mar em Portugal, Tendências Sazonais e Seculares*. Instituto Hidrográfico, Relatório DISEPLA 6/88, pp. 47.
224. TABORDA, R., DIAS, J., 1998 b) – *Implications of Sea-Level Rise for Portugal*. pp. 19.
225. TARLING, D. H., 1997 – *The Plate Tectonic Impact on Climate Change with Particular Relevance to Mesoamerica*. Quaternary International, Vol 43/44, pp. 61-66.
226. TEIXEIRA, L. F., 2005 – *Aplicação de Geoelectrics for Groundwater Exploration in a Volcanic Island: Terceira-Azores*. Relatório de Estágio da Licenciatura em Engenharia do Ambiente. Angra do Heroísmo, University of Rhode Island, Fundação Luso-Americana – Universidade dos Açores.

227. TIMLIN, D. J., STARR, J. L., CADY, R., NICHOLSON, T., 2000 – *Comparison of Estimated Ground-Water Recharge Using Different Temporal Scales of Field Data*. Agricultural Research Service, Tektran. Web page sita em: <http://www.nal.usda.gov/ttic/tektran/data/000011/32/0000113240.html> (consultado em 2004).
228. TIMLIN, D. J., STARR, J. L., CADY, R., NICHOLSON, T., 2002 – *Field Studies for Estimating Uncertainties in Groundwater Recharge Using Near-Continuous Piezometric Data*. Agricultural Research Service, Tektran. Web page sita em: <http://www.nal.usda.gov/ttic/tektran/data/000012/81/0000128153.html> (consultado em 2004).
229. TITUS, J., NARAYANAN, V., 1996 – *The Risk of Sea Level Rise: A Delphic Monte Carlo Analysis in Which Twenty Researchers Specify Subjective Probability Distributions for Model Coefficients Within their Respective Areas of Expertise*. Climatic Change, Vol. n° 33, pp. 151-212.
230. TITUS, J. G., RICHMAN, C., 2000 – *Maps of Lands Vulnerable to Sea Level Rise: Modelled Elevations along the US Atlantic and Gulf Coasts*. Climate Research, N.º 33, pp. 34.
231. THIELER, E. R., HAMMAR-KLOSE, E. R., HOLE, W., 1999 – *National Assessment of Coastal Vulnerability to Sea-Level Rise. Preliminary Results for the US Atlantic Coast*. US Geological Survey Open-File Report 99-593.
232. THORNTHWAITE, C. W., MATHER, J. R., 1957 – *Instructions and Tables for Computing the Potential Evapotranspiration and the Water Balance*. Centerton, Laboratory of Climatology Publication, n.º 10.
233. TOMÉ, A. R., MIRANDA, P. M. A., 2004 – *Piecewise Linear Fitting and Trend Changing Points of Climate Parameters*. Geophysical Research Letters, N.º 31, L02207, doi: 12.1029/2003, G019100.
234. TRIPET, J.-P., DOERFLIGER, N., ZWAHLEN, F., DELPORTE, C., 2000 – *Vulnerability Mapping in Karst Areas and its Uses in Switzerland*. Ljubljana, Acta Carsologica, Vol. 29/1, Fasc. N.º 12, pp. 163-171.
235. VALERIANO MADEIRA, M. A., 1981 – *Esboço Pedológico da Ilha de Santa Maria (Açores)*. Lisboa, Instituto Nacional de Investigação Científica, Centro de Pedologia da Universidade Técnica de Lisboa, pp. 121.
236. VAN STEMPOORT, D., EWERT L., WASSENAAR, L., 1992 – *AVI: A Method for Groundwater Protection Mapping in Prairie Provinces of Canada*. PPDW Pilot Project, Groundwater and Contaminants Project, Environmental Sciences Division, National Hydrology Research Institute.
237. VERMEULEN, H., LOBO FERREIRA, J. P., OLIVEIRA, M. M., 1993 – *A Method for Estimating Aquifer Recharge in DRASTIC Vulnerability Mapping*. Comunicação apresentada ao Seminário “Águas Subterrâneas e Ambiente”, Lisboa, Maio 1993, Associação Portuguesa de Recursos Hídricos, pp. 10.

238. VERMEULEN, H., LOBO FERREIRA, J. P., OLIVEIRA, M. M., 1994 – *A Method for Estimating Aquifer Recharge in DRASTIC Vulnerability Mapping* in “Advances in Water Resources Technology and Management”. Ed. G. Tsakiris e M.A. Santos, Rotterdam, A.A. Balkema, “Proceedings of the Second European Conference on Advances in “Water Resources Technology and Management”, Lisboa, Junho 1994, European Water Resources Association.
239. VISSER, H., FOLKERT, R. J. M., HOEKSTRA, J., WOLFF, J. J., 2000 – *Identifying Key Sources of Uncertainty in Climate Change Projections*. *Climatic Change*, N.º 45, pp. 421-457.
240. VOIGT, R., 1993 – *Berechnung und Visualisierung Stationärer 3D-Bahnlinien im Finite-Element-Grund-Wassersimulationssystem FEFLOW*. Wasy GmbH.
241. WATSON, R. T., ZINYOWERA, M. C., MOSS, R. H., DOKKEN, D. J., 1988 – *IPCC Special Report on The Regional Impacts of Climate Change: An Assessment of Vulnerability*. Web page sita em: <http://www.grida.no/climate/ipcc/regional> (consultado em 2001).
242. WENGEN WORKSHOPS ON GLOBAL CHANGE RESEARCH, 2000 – *Wengen Workshops on Global Change Research, Summary*. Web page sita em: <http://www.uifr.ch/geoscience/geographic/EVENTS/Wengen/00/Wen00sum.html> (consultado em 2002).
243. WMO, 2001 – *World Climate News. Agents of Climate Change*. World Meteorological Organization, Nº 18, January 2001, pp. 16.
244. WORKING GROUP I DO IPCC, 2001 a) – *Summary for Policymakers: A Report of the Working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, pp. 20.
245. WORKING GROUP I DO IPCC, 2001 b) – *Climate Change 2001: Synthesis Report. Summary for Policymakers*. IPCC, pp. 33.
246. WORKING GROUP I DO IPCC, 2001 c) – *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Summary for the Policymakers and Technical Summary of the Working Group I Third Assessment Report*. IPCC, UNEP, WMO, pp. 98.
247. WORKING GROUP II DO IPCC, 2001 – *Climate Change 2001: Summary for Policymakers: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. IPCC, pp. 17.
248. ZBYSZEWSKI, G., MOITINHO D’ALMEIDA, F., FERREIRA, O. V., ASSUNÇÃO, T., 1958 – *Notícia Explicativa da Carta Geológica de Portugal, Escala 1:50 000, Ilha de S. Miguel (Açores) – Folha B*. Lisboa, Serviços Geológicos de Portugal, pp. 37.
249. ZBYSZEWSKI, G., FERREIRA, O. V., ASSUNÇÃO, T., 1959 a) – *Notícia Explicativa da Carta Geológica de Portugal, Escala 1:50 000, Ilha de S. Miguel (Açores) – Folha A*. Lisboa, Serviços Geológicos de Portugal, pp. 22.

250. ZBYSZEWSKI, G., MOITINHO D'ALMEIDA, F., FERREIRA, O. V., ASSUNÇÃO, T., 1959 b) – *Notícia Explicativa da Carta Geológica de Portugal, Escala 1:25 000, Ilha do Faial (Açores)*. Lisboa, Serviços Geológicos de Portugal, pp. 25.
251. ZBYSZEWSKI, G., FERREIRA, O. V., ASSUNÇÃO, T., 1961 – *Notícia Explicativa da Carta Geológica de Portugal, Escala 1:50 000, Ilha de Santa Maria (Açores)*. Lisboa, Serviços Geológicos de Portugal, pp. 27.
252. ZBYSZEWSKI, G., RIBEIRO FERREIRA, C., FERREIRA, O. V., ASSUNÇÃO, T., 1963 a) – *Notícia Explicativa da Carta Geológica de Portugal, Escala 1:50 000, Ilha do Pico – Folha A (Açores)*. Lisboa, Serviços Geológicos de Portugal, pp. 24.
253. ZBYSZEWSKI, G., RIBEIRO FERREIRA, C., FERREIRA, O. V., ASSUNÇÃO, T., 1963 b) – *Notícia Explicativa da Carta Geológica de Portugal, Escala 1:50 000, Ilha do Pico – Folha B (Açores)*. Lisboa, Serviços Geológicos de Portugal, pp. 21.
254. ZBYSZEWSKI, G., CÂNDIDO DE MEDEIROS A., FERREIRA, O. V., ASSUNÇÃO, T., 1967 – *Notícia Explicativa da Carta Geológica de Portugal, Escala 1:25 000, Ilha do Corvo (Açores)*. Lisboa, Serviços Geológicos de Portugal, pp. 16.
255. ZBYSZEWSKI, G., CÂNDIDO DE MEDEIROS A., FERREIRA, O. V., ASSUNÇÃO, T., 1968 – *Notícia Explicativa da Carta Geológica de Portugal, Escala 1:25 000, Ilha das Flores (Açores)*. Lisboa, Serviços Geológicos de Portugal, pp. 31.
256. ZBYSZEWSKI, G., CÂNDIDO DE MEDEIROS A., FERREIRA, O. V., ASSUNÇÃO, T., 1971 – *Notícia Explicativa da Carta Geológica de Portugal, Escala 1:50 000, Ilha Terceira (Açores)*. Lisboa, Serviços Geológicos de Portugal, pp. 43.
257. ZBYSZEWSKI, G., CÂNDIDO DE MEDEIROS A., FERREIRA, O.V., ASSUNÇÃO, T., 1972 – *Notícia Explicativa da Carta Geológica de Portugal, Escala 1:25 000, Ilha Graciosa (Açores)*. Lisboa, Serviços Geológicos de Portugal, pp. 31.
258. ZWAHLEN, F. DOERFLIGER, N., 1997 – *Outlining Protection Areas in Karstic Environment, a New Approach*. Proceedings of the Karst-Water Environment Symposium. Virginia Water Resources Research Center, Virginia Polytechnic Institute and State University, pp. 68-79.

ANEXOS

ANEXO 1. IMPACTOS DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS: A ALTERAÇÃO DO NÍVEL DO MAR

Para a avaliação dos possíveis impactos da *subida do nível do mar* nos meios hídricos costeiros é necessário determinar os padrões de alteração deste nível à escala local. A subida global do nível do mar deve-se basicamente a dois mecanismos: a expansão térmica das águas dos oceanos e o degelo dos glaciares e calotes glaciares tendo, no caso do degelo das calotes glaciares, maior impacto sobre a subida global do nível do mar o degelo das que se situam sobre as massas continentais. Estes dois mecanismos são por sua vez despoletados pelo aquecimento da superfície dos continentes e dos oceanos por parte do aumento da radiação térmica que atinge a superfície terrestre (efeito de estufa). Os valores apontados para a taxa de subida global do nível do mar são da ordem de 2 mm/ano para o último século (Douglas, 1991, *in* Douglas 1995) e IPCC (2001 a), embora esta última entidade admita que tal taxa possa de facto oscilar entre 10 a 20 cm para o século XX. Vários investigadores, entre eles Varekamp *et al.* (1992 *in* Douglas, 1995), assinalam que esta subida mostra uma aceleração face às taxas de subida registadas nos milénios antecedentes, dedutíveis a partir dos registos históricos e geológicos, sugerindo a possibilidade da taxa de subida global do nível do mar actualmente registada vir a sofrer um incremento devido ao aquecimento global (Douglas, 1995). Nesta linha de raciocínio, alguns autores sugerem as seguintes taxas de subida do nível do mar (Quadro 1.1), caso se mantenha estritamente o actual cenário de aquecimento global (ou seja, mantendo as futuras emissões de gases de estufa, CFC's, aerossóis, etc. aos níveis actualmente registados):

Quadro 1.1 – Taxas de Subida Global do Nível do Mar Calculadas por Diferentes Autores

Autor	Taxa de Subida (cm)	Período Temporal
Church <i>et al.</i> (1991 <i>in</i> Douglas 1995)	35	2000 a 2050
IPCC (2001 a)	18	2000 a 2030
	44	2000 a 2070
	50 (*)	2000 a 2100
Titus e Narayanan (1996)	34 ¹⁰⁶ a 100 ¹⁰⁷	2000 a 2100
Douglas (1992), Woodworth (1990, <i>in</i> Douglas, 1995)	20	2000 a 2100

(*) este é uma “best estimate” considerando o somatório final de todos os factores que contribuem para este processo e não apenas o efeito dos gases do efeito de estufa.

Estas estimativas equivalem a uma subida de pelo menos uma ordem de magnitude superior à aceleração observada a partir dos registos de marégrafos nos últimos 150 anos, verificando-se que nos próximos 20 a 30 anos haja cerca de 65% de probabilidades de que a subida do mar se dê cerca de 1 mm/ano mais depressa relativamente às taxas de subida do século XIX (Titus e Narayanan, 1996). Com o aumento das emissões dos gases de efeito de estufa, o conseqüente aumento do efeito de estufa tenderá a causar uma aceleração na subida do nível do mar superior aos valores registados actualmente. A dependência da subida do nível do mar das concentrações de gases de efeito de estufa na atmosfera é provada por Titus e Narayanan (1996) que após trabalhos de modelação verificaram que estes gases contribuiriam para uma subida

¹⁰⁶ 50% de probabilidades deste valor ser excedido no ano 2100.

¹⁰⁷ 1% de probabilidades deste valor ser excedido.

global do nível do mar de cerca de 0,5 mm/ano nos séculos XIX-XX, enquanto os marégrafos apontam para uma subida total do nível do mar (efeito conjugado de gases de efeito de estufa e outros factores) de cerca de 1,8 mm/ano para o mesmo período, de acordo com os mesmos autores. Contudo alguns autores, como Singer (1999), em <http://www.sepp.org/NewSEPP/sealevel.html>, não subscrevem a hipótese da aceleração da subida do nível do mar, referindo que um aquecimento global não deveria acelerar mas diminuir a taxa de subida do nível do mar, em larga medida devido a que este aquecimento provocará um aumento da precipitação sobre a calote antárctica e consequente retenção da água sob a forma de gelo. Este mesmo autor refere que apenas cerca de 20% da subida do nível global do mar no último século pode ser explicada pelos efeitos do nível do mar e que outros fenómenos estarão em jogo. Em Portugal Continental a análise dos dados das séries maregráficas de Cascais e de Lagos, para o período de 1880-2000, efectuada por Dias e Taborda (1992), mostram um registo de subidas de 1,2 a 1,7 mm/ano, conforme portanto aos valores 2 mm/ano referido por Douglas (1991). Isto equivale a uma subida do nível do mar entre os 10 a 20 cm para a totalidade do século passado. Tentando avaliar a evolução futura, SIAM (2001) calcula valores de subida deste mesmo nível de 25 a 110 cm até à década de 2080 para o litoral continental português, o que parece indiciar uma aceleração da subida do nível do mar.

A evolução do nível do mar numa dada região não depende apenas da evolução global deste mesmo nível – que Emery e Aubrey (1985) considera na ordem dos 3 mm/ano – mas à sobreposição desta evolução global do nível do mar com a evolução geotectónica que se verifica nessa região. Esta evolução geotectónica é função de (Figura 1): (1) elevações ou rebaixamentos da crosta terrestre devidas a movimentos eustáticos, (2) empolamentos ou devidos a expansões nas câmaras magmáticas de áreas vulcânicas, (3) abatimentos devidos a colapsos nas câmaras magmáticas de zonas vulcânicas, (4) elevações ou descidas devidas a movimentos de elevação ou abatimento de blocos de falha (ex.: durante eventos sísmicos), (5) variação global do nível do mar. Ou seja, à ***alteração global do nível do mar*** sobrepõe-se uma ***alteração local do nível do mar*** e é o conjunto destas duas que causa os impactos sobre aquíferos e pontos de água referidos no capítulo acima. O estudo dos registos dos marégrafos para uma determinada região dá-nos a medida desta ***alteração local do nível do mar*** para essa mesma região. A variação global do nível do mar obtêm-se do conjunto de medições ao longo das várias estações do planeta, depois de expurgadas dos efeitos tectónicos, hidrostáticos e de alterações cíclicas do nível do mar. No caso dos Açores esta ***alteração local do nível do mar*** é obviamente influenciada pela história tectónica e vulcânica de cada uma das nove ilhas, podendo ser diversa de ilha para ilha em função da respectiva taxa de actividade vulcânica, subsidência e eventos sísmicos, tornando-se a interpretação desta alteração local ainda mais complexa porque além ser uma área tectono-vulcânica activa, as suas várias ilhas encontram-se em ambientes geotectónicos levemente diversificados o que é expresso pelas suas diferentes histórias de actividade sismo-vulcânica.



Figura 1 – Alterações Locais do Nível do Mar, Registadas pelos Marégrafos da Rede de Medições dos EUA (Landon/NOAA, 2000)

A determinação das variações (diárias, mensais, anuais, plurianuais) do nível do mar faz-se por meio de leituras em marégrafos e a definição da subida do nível do mar relativamente à costa faz-se por regressão linear destes dados, ao longo de vários anos de observação. Sendo este um processo de grande extensão temporal, afectado tanto por movimentos verticais da crosta (afundamento ou elevação) como por um conjunto diversificado de factores oceânicos que se reflectem em diferentes tipos de ciclos de oscilação do nível médio do mar (ex.: Oscilação do Atlântico Norte) com natureza e extensão distintas (ex.: no caso de oscilações originadas por causas de natureza astronómica um dos ciclos mais significativos tem período de cerca 19 anos) é necessário que as séries de dados a partir das quais se realize a análise da evolução do nível do mar para um dado local sejam bastante extensas, aconselhavelmente superiores a 70 anos (Douglas, 1991; Pugh, 1987 e Sturges, 1987, *in* Douglas, 1995), de modo a serem pouco afectadas pelos diversos factores que influem na oscilação temporária do nível do mar – chamadas por vezes de flutuações de baixa frequência – e que têm existência interdecadal ou de período ainda mais longo. Este facto causa alguns problemas pois em várias regiões do globo as séries são inferiores a 50 anos e/ou então estão interrompidas por longos períodos de tempo, como é o caso das séries mais extensas dos Açores (ex.: Horta e Angra do Heroísmo). A adicionar a este problema está o facto de que os movimentos crustais se sobrepõem aos efeitos da subida do nível do mar e registos de marégrafos em zonas geologicamente activas devem ser tratados com bastante suspeita. Assim, quanto mais longas forem as séries melhor será a fiabilidade dos resultados relativos à alteração do nível do mar. Nos Açores os tipos de marégrafos existentes são:

- Ponta Delgada (S. Miguel) – existem dois tipos de marégrafos – (1) Térmico, (2) Pressão (por azoto) – sitos entre 3 a 4 m da linha de costa, e do conjunto das medições de ambos é definido o nível do mar.

- Angra do Heroísmo – Flutuador e Contrapeso Analógico. Segundo a Tabela de Marés 2003 – Volume I, do Instituto Hidrográfico (2002) as alturas de maré são referidas ao zero hidrográfico e o zero hidrográfico é 1,00 m abaixo do nível médio adoptado, ou seja, 5,385 m abaixo da marca de contacto existente na borda do poço do marégrafo, o que corresponde a 16,032 m abaixo da marca O4 1951 do IPCC existente do lado direito da porta principal da Câmara Municipal de Angra do Heroísmo.
- Horta – Flutuador e Contrapeso analógico.
- Flores – (1) Flutuador e Contrapeso digital (posto de Lajes das Flores); (2) Flutuador e Contrapeso analógico (posto de Santa Cruz das Flores).

Nos Açores as séries têm extensão superior a 30 anos mas com longos períodos sem leituras, que vão de vários meses ao longo de um ano a períodos de vários anos. Os períodos com dados mais ou menos ininterruptos são no geral inferiores a 30 anos, o que levanta dúvidas às tendências de alteração do nível do mar que destes registos se possam inferir, apesar das tendências obtidas se situarem no intervalo de valores considerado de subidas do nível do mar a nível global. Esta situação é sintetizada no Quadro 1.2.

Quadro 1.2 – Percentagens de Dados em Falta Face à Totalidade das Séries de Registos de Marégrafos

Estações	Séries totais	% Anos completos	% Anos incompletos	% Anos em falta
Ponta Delgada 1	73 anos	36,99	27,40	35,62
Angra do Heroísmo	63 anos	34,92	23,81	41,27
Horta	92 anos	54,35	14,13	31,52
Flores	40 anos	50,00	27,50	22,50

A utilização de séries de curta extensão temporal para a avaliação das alterações do nível do mar (em especial quando definidas para antes e após os maiores períodos de ausência de dados) é pouco fiável dado estas poderem reflectir os eventos cíclicos de curta duração em vez de uma real alteração na taxa de subida global do nível do mar. Por exemplo, e de acordo com Barnett (1983) até ao início da década de 1960 o mar encontrava-se num ciclo de subida, tendo atingido um máximo um pouco antes de 1960, descendo desde essa altura até ao final dos dados considerados no seu artigo (isto é, década de 1970). No caso dos Açores a situação complica-se com os efeitos da actividade tectónica, sísmica e vulcânica que afectam as leituras e funcionamento dos marégrafos, sem contar já com a alteração que podem provocar a nível local na evolução do nível do mar (ex.: um empolamento crustal devido a uma maior actividade magmática numa dada década poderá causar uma descida local do nível do mar mesmo que a nível mundial se esteja por exemplo num ciclo de subida), a que acresce a mudança de autoridade responsável pela operação das estações, o que ocorre em todas as estações tipicamente após longos períodos de hiatos nos registos (década de 60-70 para Ponta Delgada e Angra do Heroísmo, primeira metade da década de 70 para a estação das Flores) e que nalguns casos leva a problemas de definição das cotas de referência que podem ser significativos (informação oral, Fernando Vasquez).

Considerando todas estas contingências, os valores calculados de variação do nível do mar devem ser tomados como simples indicadores da sua evolução actual e apenas para a ilha em que são obtidos, que da ausência de uma tendência inequívoca de evolução do nível do mar, foram usados como possíveis cenários de evolução do nível do mar. Estabelecidos tais cenários – sem os quais não é possível a análise de uma

componente importante da vulnerabilidade dos recursos hídricos das ilhas às alterações climáticas – procurou-se verificar como os diferentes valores de evolução do nível do mar poderão determinar:

- Que regiões actualmente emersas poderão ser inundadas, determinando as cotas a que o nível do mar passará a situar-se;
- Que nascentes, poços de maré e furos ficarão em risco de submersão ou serão afectados pela intrusão salina;
- Como a deslocação espacial da interface água doce/água salgada, aquíferos ou áreas dentro dos aquíferos, furos e poços podem ser afectados por esta deslocação;
- Que eventuais aquíferos suspensos actualmente isolados do mar poderão ficar em contacto com a futura cunha salina, passando a ser susceptíveis ao risco de intrusão salina;
- A eventual alteração na área dos aquíferos de base, pelos processos de redução da área emersa das ilhas por efeito conjunto tanto da alteração das taxas de erosão (ex.: um recuo acelerado das arribas) como da própria alteração do nível do mar em si (ex.: submersão de áreas do litoral devido à subida do nível do mar).

O arquipélago dos Açores tem registos integrados no GLOS e no PSMSL consultáveis em http://www.pol.ac.uk/psmsl/psmsl_individual_stations.html (a fonte com maior número de dados disponíveis, incluindo dados bastante actualizados) para as estações indicadas no Quadro 1.3. Com base nestes dados, a regressão dos níveis médios do mar versus tempo mostra as seguintes taxas de variação do nível do mar ao longo do século XX (Quadros 1.4 e 1.5):

Quadro 1.3 – Marégrafos dos Açores

Estações	Código da estação		Localização	Total de Anos da Série	N.º Anos Com Dados		N.º Anos Sem Dados
	PSMSL	GLOSS			N.º Anos Completos	N.º Anos Incompletos	
Ponta Delgada	360/001	245	37 44 N 25 40 W	73 (1)	27	20	26
Ponta Delgada 2	360/002	245	37 44 N 25 40 W	7 (2)	5	2	0
Angra Heroísmo	360/011	--	38 39 N 27 14 W	63 (3)	22	15	26
Horta	360/031	--	38 32 N 28 38 W	92 (4)	50	13	29
Flores	360/041	244	39 27 N 31 07 W	40 (5)	20	11	9

(1) Série = 1924 a 1996; Anos incompletos = 1933, 1935, 1938, 1950, 1951, 1958, 1959, 1960, 1962, 1963, 1978, 1982, 1984, 1985, 1986, 1987, 1988, 1990, 1991, 1996; Anos em falta = 1924 a 1929, 1953, 1961, 1964 a 1977, 1980 e 1981, 1992 a 1995; (2) Série = 1993 a 1999; Anos incompletos = 1993 e 1997; (3) Série = 1933 a 1996 para os anos de 1979 a estação está 11.5 m abaixo do TGBM, considerando PSMSL que toda a estação deve ser tomada com cuidado; Anos em falta = 1940, 1946 a 1948, 1963 a 1975, 1986 a 1995; Anos incompletos = 1937, 1938, 1939, 1941, 1942, 1945, 1949, 1953, 1955, 1957, 1962, 1976, 1984, 1985, 1996; (4) Série = 1905 a 1996; Anos em falta = 1939 a 1944, 1946 a 1956, 1972, 1974, 1978, 1987 a 1995; Anos incompletos = 1905, 1912, 1918, 1921, 1922, 1925, 1929, 1957, 1977, 1979, 1985, 1986, 1996; (5) Série = 1957 a 1996; Anos em falta = 1970 a 1975, 1983, 1990 e 1991; Anos incompletos = 1965, 1967, 1976, 1978, 1982, 1987, 1988, 1989, 1992, 1994, 1995; antes de 1976 as medições baseavam-se nos registos de maré alta e maré baixa, toda a estação deve ser tomada com cuidado, especialmente os anos de 1980 a 1982.

Quadro 1.4 – Tendências de Evolução do Nível do Mar (em mm/ano) a partir dos Registos de Marégrafos

Estações	Série total	Série 1930 a 1963		Série 1978 a 1996	
Ponta Delgada 1 – séries mensais	-4,90	3,94		1,69	
Ponta Delgada 1 – séries anuais	-5,15	3,50		0,85	
Ponta Delgada 2 – séries mensais	6,16 (1)	--		--	
Ponta Delgada 2 – séries anuais	5,43 (1)				
Ponta Delgada 1 e 2 – séries mensais	-4,76	4,67 (2)		2,41 (2a)	
Ponta Delgada 1 e 2 – séries anuais	-4,98	4,70 (2)	3,86 (3)	1,94 (2a)	
	Série total	Série 1933 a 1962		Série 1976 a 1985	
Angra do Heroísmo – séries mensais	-2,21	6,34		15,22	6,25 (4)
Angra do Heroísmo – séries anuais	-2,20	6,35		12,75	5,67 (4)
	Série total	Série 1957 a 1969		Série 1976 a 1996	
Flores – séries mensais	-7,78	1,04		-3,37	
Flores – séries anuais	-8,02	0,56		-2,70	
	Série total	Série 1905 a 1920	Série 1921 a 1938	Série 1905 a 1938	Série 1957 a 1986
Horta – séries mensais	1,66	-1,01	2,11	0,89	-5,31
Horta – séries anuais	1,40	-1,06	1,69	0,86	-5,98

(1) série de 1993 a 1999; (2) Série 1930 a 1959; (2a) Série 1978 a 1999; (3) Série 1924 a 1963; (4) Série 1976 a 1996;

Quadro 1.5 – Tendências de Evolução do Nível do Mar (em cm ao fim de 100 anos) a Partir dos Registos de Marégrafos

Estações	Série total	Série 1930 a 1963		Série 1978 a 1996	
Ponta Delgada 1 – séries mensais	-49,0	39,4		16,9	
Ponta Delgada 1 – séries anuais	-51,5	35,0		8,5	
Ponta Delgada 2 – séries mensais	61,6 (1)	--		--	
Ponta Delgada 2 – séries anuais	54,3 (1)				
Ponta Delgada 1 e 2 – séries mensais	-47,6	46,7 (2)		24,1 (2a)	
Ponta Delgada 1 e 2 – séries anuais	-49,8	47,0 (2)	38,6 (3)	19,4 (2a)	
Angra do Heroísmo – séries mensais	-22,1	63,4		152,2	62,5 (4)
Angra do Heroísmo – séries anuais	-22,0	63,5		127,5	56,7 (4)
	Série total	Série 1957 a 1969		Série 1976 a 1996	
Flores – séries mensais	-77,8	10,4		-33,7	
Flores – séries anuais	-80,2	5,6		-27,0	
	Série total	Série 1905 a 1920	Série 1921 a 1938	Série 1905 a 1938	Série 1957 a 1986
Horta – séries mensais	16,6	-10,1	21,1	8,9	-53,1
Horta – séries anuais	14,0	-10,6	16,9	8,6	-59,8

(1) série de 1993 a 1999; (2) Série 1930 a 1959; (2a) Série 1978 a 1999; (3) Série 1924 a 1963; (4) Série 1976 a 1996;

Tomando os valores das séries desde o seu início, parece registar-se para Angra do Heroísmo (Quadros 1.3, 1.4 e 1.5) uma tendência global de descida do nível do mar a uma taxa da ordem dos 2 mm/ano (20 cm no ano 2100); é questionável se esta emersão da ilha (Quadro 1.6) retrata empoamento crustal devido a actividade magmática ou se será um efeito das grandes lacunas de dados na série.

Quadro 1.6 – Taxas de Variação do Nível do Mar Conforme Deduzidas a Partir dos Registos dos Marégrafos para as Décadas de 1930-1950

Estação (décadas de 1930-1965)	Taxa de variação (mm/ano)
Ponta Delgada – valores anuais	+ 3,496
Angra Heroísmo – valores anuais	+ 6,349
Horta – valores anuais	+ 4,664
Flores – valores anuais (1)	--

(1) os registos referem-se apenas ao período após 1957

Para as década de 60-85 não é possível obter-se quaisquer conclusões fiáveis para as estações de Angra do Heroísmo e de Ponta Delgada, pois os dados existentes neste período são muito escassos embora apontem para uma descida. Esta descida parece ser reafirmada pelos dados das estações das Flores e Horta (vide Quadro 1.7), o que de algum modo concorda com as informações de Barnett (983) que aponta para uma tendência de descida para a década de 60-70 integrada num dos ciclos de oscilação do nível do mar para o Atlântico Norte.

Quadro 1.7 – Taxas de Variação do Nível do Mar Conforme Deduzidas a Partir dos Registos dos Marégrafos para as Décadas de 1960-1980

Estação (décadas de 1960-1985)	Taxa de variação (mm/ano)
Ponta Delgada – valores anuais	- 14,77(1)
Angra Heroísmo – valores anuais	- 8,43(1)
Horta – valores anuais	- 7,05
Flores – valores anuais	-10,16

(1) sem representatividade devido aos pouquíssimos dados registados neste período

Dada a impossibilidade de se obterem indicações inequívocas quanto à evolução do nível no mar para os Açores, optou-se por considerar um conjunto de cenários, elaborados com base nos diferentes resultados dos marégrafos, que são:

- **Cenário 1** – Subida anual de 15,22 mm/ano. Este é o valor máximo registado de tendência de subida (numa sub-série de Angra do Heroísmo).
- **Cenário 2** – Subida anual de 5 mm/ano. Estas são condições médias para Ponta Delgada 2 e médias aproximadas das sub-séries da década de 1930-1965 para as estações de Ponta Delgada 1 e 2.
- **Cenário 3** – Subida anual de 1,5 mm/ano. Estas são as condições que parecem ser apontadas pela série total dos registos para a ilha do Faial.
- **Cenário 4** – Subida anual de 0,5 mm/ano. Este é o valor mínimo de subida e que se pode associar à série mais antiga das Flores.
- **Cenário 5** – Descida anual de 0,5 mm/ano. Este valor regista-se para a série de 1976-1986 para Ponta Delgada, podendo corresponder ao valor limite inferior de descidas.
- **Cenário 6** – Descida anual de 5 mm/ano. Este valor regista-se para o conjunto total de dados de Ponta Delgada 1.
- **Cenário 7** – Descida anual de 8 mm/ano. Este valor regista-se para o conjunto total de dados das Flores.

Para determinar a extensão de área perdida ou ganha exclusivamente devido ao aumento e/ou redução de área imersa (sem contar com os efeitos erosivos) devido às alterações do nível do mar sobrepuseram-se às cartas topográficas e modelos digitais de terreno os valores do nível do mar extrapolados para 2100, para cada um dos cenários

considerados. Assim, para os tipos de litoral existentes nos Açores, pode traçar-se a seguinte evolução, com base nos cenários de alteração do nível do mar estabelecidos a partir das séries de observações dos marégrafos, quanto à perda/ganho de terra emersa devida apenas ao fenómeno da alteração nível do mar:

- *litoral de arriba* – não sofre qualquer alteração em termos de área emersa perdida (no caso de subida do nível do mar) ou ganha (caso de descida do nível do mar); é portanto um tipo de litoral **pouco susceptível** aos processos de submersão ou emersão associados à variação do nível do mar. Contudo pode ser altamente susceptível ao incremento da erosão provocada por uma eventual subida do nível do mar.
- *litoral de fajã* – as perdas crêem-se que sejam no geral reduzidas pois as suas cotas médias são razoavelmente superiores à maioria das subidas do nível do mar de cada um dos cenários desfavoráveis. Deste modo o avanço do mar fica confinado apenas a uma faixa muito estreita do litoral, mesmo para o cenário mais catastrófico (subida de 1,5 m); no caso de cenários de descida do nível do mar um aumento mais significativo de terra emersa é possível, embora limitado; é portanto um tipo de litoral de **susceptibilidade intermédia** aos processos de submersão ou emersão associados à variação do nível do mar,
- *litoral de praia* – as perdas tendem a ser mais significativas, mas a situação varia consoante as condições de cada ilha, com as praias mais pequenas tendendo a desaparecer por completo (ex.: pequenas enseadas de praia de calhau ou de areia na Ilha Terceira) ou quase por completo. Pressupondo que o aporte de sedimentos permanece pouco alterado, a subida do nível do mar terá como efeito fazer recuar a linha de costa. Quando a topografia permite a formação de praias de extensão apreciável, o recuo destas é possível e elas preservam-se recuando para o interior; quando topografia cria uma barreira (ex.: existência de arribas a montante) a esta migração a subida do nível do mar tende a submergir por completo tais zonas. Assim, as praias de extensão reduzida – a grande maioria nos Açores – estão mais ou menos condenadas à desapareição, e as mais desenvolvidas a perder uma faixa significativa de território (ex.: certos sectores da praia entre Praia da Vitória e Cabo da Praia, podem vir a perder pelo menos metade da área actualmente existente) embora nos cenários menos desfavoráveis a perda de área de praia seja apesar de tudo pouco significativa. De todos os tipos de litoral o litoral de praia apresenta a **maior susceptibilidade** aos processos de submersão ou emersão associados à variação do nível do mar.

Dado que o tipo de litoral preponderante nos Açores é o litoral de arriba e que os litorais de praia e fajã correspondem a uma percentagem muito diminuta do total, então a simples alteração do nível do mar causará uma alteração muito reduzida na área emersa (tanto nos casos de tendência para a emersão como para os casos de afundamento), sendo o impacto negligenciável em termos de alteração das dimensões dos aquíferos de base. No caso da ilha Terceira, em termos de área emersa, poderá desaparecer grande parte da praia da Praia da Vitória até Cabo da Praia e a quase totalidade da área das pequenas praias de calhau existentes no resto da ilha.

Considerando os efeitos da erosão associada à alteração do nível do mar, reconhecem-se diferentes respostas a esta erosão em função dos diferentes tipos de litoral e respectivo estado de equilíbrio. Os litorais podem agrupar-se nas seguintes categorias:

- Litorais não coesivos
 - Praias de areia – se em equilíbrio, o aporte de sedimentos acompanha a variação da actividade erosiva provocada pela alteração do nível do mar e as praias respondem com uma migração para o interior, estabelecendo o seu novo perfil de equilíbrio a cotas mais elevadas (Sanchez-Arcilla *et al.*, 1997), caso a topografia local o permita; a recessão da linha de costa pode ser calculada nestes casos por métodos de perfil de equilíbrio. Se existem barreiras topográficas ou antrópicas a esta migração a subida do nível do mar causará a redução da área das praias.
 - Praias de seixo e cascalheira.
- Litorais coesivos
 - Mangais;
 - Plataformas intertidais argilosas;
 - Arribas consolidadas – sofrem (como aliás todos os litorais rochosos) um aumento da energia de ataque das ondas, dado ocorrer uma menor dissipação da energia na base da arriba, devido ao facto das plataformas de frente da arriba se encontrarem, na sequência da subida do mar, a maiores profundidades; isto provoca uma maior velocidade de recuo das arribas, que é dependente da resistência das rochas constituintes e da orientação dessa mesma arriba face à ondulação dominante (Taborda e Dias, 1998 b).
 - Arribas pouco consolidadas;
 - Depósitos de fajã;
 - Zonas húmidas costeiras (ex.: ambientes lagunares);
 - “Praias” de argila;
 - Depósitos argilosos palustres;
 - Turfeiras litorais;
 - Deltas de inundação.

A determinação da evolução dos perfis litorais com a alteração do nível do mar está razoavelmente estudada para *litorais de praia de areia*, onde a evolução da linha de costa tende a responder no sentido da elaboração de um perfil de equilíbrio para as novas condições. Esta evolução obedece a uma relação matemática entre a subida do nível do mar e o recuo da linha de costa – a **regra de Bruun** – desde que tal alteração permita manter as condições básicas de equilíbrio do perfil de praia. Na prática a **Regra de Bruun** (Bruun, 1962) define a resposta de longo termo do perfil de uma praia à subida do nível do mar em condições de equilíbrio, sendo independente da forma do perfil da praia:

$$R_{\infty} = S \frac{L_*}{H_* + B} \quad \text{Eq. A}$$

Onde:

R - recessão da linha de costa

L_* - largura do perfil activo

$(H_* + B)$ - extensão vertical do perfil activo

∞ - indica uma resposta estática.

Neste modelo há duas componentes da resposta do perfil de praia:

- recuo da linha de costa, de valor R_{∞} , que produz um “aporte sedimentar” $R_{\infty} \times (H^* + B)$.
- aumento na elevação do perfil de equilíbrio, de um valor S , o que provoca um aumento na necessidade de sedimento, igual a $S \times L^*$.

A equação acima correlaciona estas duas respostas à subida do nível do mar e aplica-se só a litorais arenosos onde a coluna de areia depositada é suficientemente espessa para que o substrato consolidado subjacente não exerça qualquer influência nos processos de erosão, transporte e sedimentação do litoral. Esta regra tem sido modificada para acomodar uma série de características dos litorais arenosos naturais, como por exemplo o caso das perdas de finos no perfil ou a perda de sedimento para canhões submarinos ou outras zonas de sedimentação no “off-shore (Bruun, 1988) ou para o fluxo em desequilíbrio de sedimentos para dentro e para fora do perfil da praia devido a gradientes no transporte médio “longshore” de sedimento (Everts, 1985). Contudo e apesar destas modificações ela não define claramente o limite superior do perfil activo, pelo que é impossível definir um uma largura realística do perfil (L^*). Regra geral o recuo da linha de costa situa-se entre 50 e 200 vezes a subida do nível do mar, com os valores mais elevados associados a praias com os declives mais baixos e condições de energia das ondas mais elevadas (isto é, maior H^*).

Para os restantes tipos de litoral, com a excepção de alguns litorais coesivos, para nenhum dos outros tipos de litoral se alcançou ainda uma formulação matemática que relacione a subida ou descida do nível do mar com a respectiva resposta temporal da linha de costa. Nos **litorais de materiais coesivos** a erosão é distinta da de um litoral de areia porque uma vez erodidos, estes materiais já não podem ser reconstituídos (ou ressedimentados) na zona litoral na sua forma consolidada original pelo simples processo de deposição a montante ou jusante no litoral – a erosão é *irreversível* – ao passo que no litoral de praia de areia, o volume de sedimento erodido num local será depositado algures noutra local do litoral num conjunto deposicional de características similares ao que foi erodido (*erosão reversível*). A regra de Bruun, acima referida, não se aplica portanto a este tipo de litorais. O *litoral de arriba* é um caso típico deste tipo de litorais e o principal processo erosivo é o ataque das ondas à base da arriba (Sunamura, 1992), o qual obedece a (Nairn e Willis 2002 in CEM, 2002): (1) taxa de recuo de costa está directamente relacionada com a taxa de erosão na base da arriba; (2) altura da arriba não tem influência significativa no controlo do processo de recuo excepto nos casos em que a energia da região litoral é demasiado baixa para remover os detritos da erosão/queda da arriba, permitindo a formação de uma zona frontal de detritos que funciona como um escudo protector à erosão; (3) taxa local de erosão na base da arriba é proporcional ao gradiente do declive “near-shore” ao longo de qualquer ponto ao longo do perfil; (4) dependendo da estrutura da arriba, a circulação das águas subterrâneas pode aumentar as pressões dentro dos materiais e conduzir à sua instabilidade, enquanto a existência de nascentes na base das arribas pode originar erosão por exfiltração; (5) resposta à erosão diferencial dos estratos, gerando recuos diferenciais; (6) incremento da erosão devido à presença de areia em suspensão (Kamphuis, 1990). Nas *praias de seixos e cascalheiras*, todos os materiais mais finos tendem a ser eliminados e os depósitos que restam, devido à maior dimensão dos seus clastos, formam uma cobertura protectora das litologias subjacentes, que se mantém mais ou menos imóvel e cuja profundidade e dimensão é dependente das condições de agitação marítima e dimensão dos clastos (Nairn e Willis, 2002 in CEM, 2002, Capítulo III-5); este tipo de depósitos reduz e nalguns casos quase anula a erosão das arribas,

podendo torná-las estáveis. Os *litorais de fajã* têm uma natureza litológica e granulométrica no geral muito heterogénea e um grau de coesão variável que é função do teor em partículas mais finas e do grau de desenvolvimento de solos; dado o tipo e variedade de materiais constituintes, é de admitir que possuam comportamento intermédio entre as praias de seixos e as plataformas de sedimentos coesivos, funcionando muita vezes como coberturas de plataforma que protegem as arribas da erosão; admite-se que durante o processo erosivo os finos sejam transportados para o largo enquanto as fracções mais grosseiras permanecem mais ou menos *in situ*. Os litorais de *lagoas costeiras* são muito vulneráveis às alterações dos níveis do mar pois são muito afectadas pelos processos erosivos associados a tais alterações (Taborda e Dias, 1998 a; Thieler e Hammar-Klose, 1999); tipicamente estes litorais sofrem erosão nas regiões frontais expostas ao mar e assoreamento nas áreas internas, quando há contribuição fluvial para as lagoas; este assoreamento é facilitado pela subida do nível do mar, o que leva à sua rápida perda de área ou mesmo à sua desapareição (Taborda e Dias, 1998 b), devida tanto à impossibilidade dos sedimentos fluviais serem descarregados para o oceano como pela entrada de sedimentos oceânicos, tornada mais fácil pela subida do nível do mar. Nos Açores não existem verdadeiros litorais de laguna mas sim algo um pouco distinto: litorais de fajã com lagoas mais ou menos ligadas ao mar (os sistemas da lagoa da Fajã de Santo Cristo e lagoa da fajã dos Cúberes), sítios na ilha de S. Jorge; estas lagoas têm a peculiaridade face aos sistemas lagunares clássicos de não serem alimentadas por qualquer sistema fluvial, dependendo inteiramente do mar. Em conclusão, as metodologias de avaliação da evolução da erosão do litoral são:

- **Praias de areia Regra de Bruun** – aplica-se a regra de Bruun;
- **Restantes tipos de litorais** – ausência de metodologias globais, sendo necessário o estudo caso a caso, dada a grande variedade de comportamentos erosivos observados, mesmo dentro de cada tipo de litorais.

Os Açores apresentam como tipos de litoral: (1) Arriba; (2) Fajã; (3) Fajã com zonas lagunares (ex.: fajã de Santo Cristo); (4) Praias de calhau (cascalheiras e seixos); (5) Praias de areia. O litoral claramente dominante é o litoral de arriba, sendo que os restantes estão confinados a montante por arribas. Deste modo, as áreas nos Açores às quais se possam aplicar modelos como a regra de Bruun, são extremamente reduzidas. A complicar a aplicação deste método está a grande escassez de dados de base necessários, como os que se retiram dos perfis de praia. Esta quase inexistência de informação de base não se restringe apenas aos litorais de areia mas a todos os outros, conforme se pode verificar em Borges (2001). Resta assim usar os dados actuais de erosão conhecidos para os Açores, os quais não entram em consideração com os efeitos da subida do nível do mar. Os valores de erosão conhecidos para o actual nível do mar variam entre 2 cm/ano no Complexo dos Picos em S. Miguel (Forjaz, 1989 *in* Borges, 2001, vide Quadro 1.8) e 1 a 2,5 m/ano nas arribas do Mistério da Praia do Norte/Capelinhos no Faial (Madeira, 1998 *in* Borges, 2001).

Quadro 1.8 – Taxas de Erosão para o Litoral Sul de S. Miguel no Período de 1955 a 1974 (in Borges, 2001)

Local	Extensão da Arriba (km)	Altura (m)	Taxa de Erosão (m/ano)	Recuo Teórico Máximo do Litoral em 100 Anos (m)
Rib. do Mar de Baixo (Mosteiros)	0,1	10 (?)	0,05	5
Baía do Porto dos Mosteiros	0,8	10 (?)	0,6	60
Praia dos Mosteiros	0,1	10 (?)	0,7	70
S da Praia dos Mosteiros	1,0	100 (?)	0,13	13
Farol da Ferraria	0,2	100 (?)	0,06	6
Lomba da Cruz	1,0	50 - 100	0,1	10
Pta do porto das Feteiras	0,8	50 (?)	0,3	30
Fajã do porto das Feteiras/Covões	0,5	5 - 10	0,07	7
Rocha da Relva	1,5	5 - 10	0,2	20
Pópulo	1,0	5 - 10	0,05	5
Rocha Quebrada (Lagoa)	0,1	10 (?)	0,08	8
Baía de Sta. Cruz/Terras de Baixo	0,2	4 (?)	0,4	4
Termo (Lagoa)	0,1	50 (?)	0,005 (?)	0,5 (?)
Pisão	0,1	50 - 100	0,3	30
Arriba da Prainha (Água d'Alto)	0,15	10 (?)	0,1	10
Água d'Alto (leque aluvionar)	0,8	4 - 10	0,6	60
Roída da Praia/Rocha do Campos	0,2	50 - 70	0,3	30
Arriba da praia do Arruda	0,17	5 - 10	0,5	50
Piquinhos (Água d'Alto)	0,7	20 - 30	0,2	20
Meio Moio (Ponta Garça)	0,7	100 (?)	0,01	1
W do farol de Ponta Garça	0,2	100 (?)	0,1	10
Fajã a W do farol de Ponta Garça	0,2	5 - 10	0,3	30
Ponta Garça (E do farol)	0,3	50 (?)	0,03	3
Arriba da praia da Rib. Quente	0,25	10 - 20	1,2	120
Pta da Albufeira/Castelo	1,1	2 - 5	0,8	80
E do porto da Rib. Quente	0,1	20 - 40	0,2	20
Fajã do Sagarracho (Povoação)	0,8	5 - 10	0,3	30
Fajã da Ponta do Faial	0,5	5 - 10	0,2	20
Faial da Terra	0,7	2 - 6	0,2	20
Fajã do Calhau (Faial da Terra)	1,7	4 - 10	0,15	15
Fajã do Lombo Gordo (Nordeste)	0,6	2 - 6	0,2	20

Portanto, se se admitisse que as condições do nível do mar até 2100 se mantivessem idênticas às actuais, o recuo total no litoral sul de S. Miguel, nas áreas de praia de areia, variaria entre 0,5 m e 120 m (vide Quadro 1.8), com valores médios de cerca de 26 m. Contudo, sabendo-se que numa situação de alterações climáticas o nível do mar variará e com ele as taxas de erosão associadas, é de admitir que, se considerarmos cenários de subida deste nível, o recuo da linha de costa em 2100 será superior aos valores do Quadro 1.8.

Para litorais complexos – ex.: Capelinhos – o recuo do litoral que tem sido registado pode não ser linear (Quadro 1.9), o que ainda mais complica a previsão da evolução da erosão litoral em condições de alteração do nível do mar.

Quadro 1.9 – Taxa de Erosão para os Capelinhos (Machado e Freire, 1985 in Borges, 2001)

Data da Medição		Recuo Total da Arriba (m)	Recuo Médio em Relação ao Levantamento Anterior (m/ano)
Ano	Mês		
1958	8	0	?
1959	5	200	290
1964	7	340	27
1975	9	490	13
1981	3	520	6

Com base nos dados existentes fez-se uma limitada análise da evolução da erosão em função da alteração do nível do mar, para a ilha Terceira, que é a ilha em estudo. Consideraram-se os três tipos de litorais mais representativos da ilha Terceira: (1) Arribas, (2) Praias de areia, (3) Praias de calhau. Para a avaliação muito genérica da evolução da linha costeira para as praias de areia usaram-se os cenários de evolução do nível do mar estabelecidos a partir das leituras dos marégrafos e dados gerais relacionados com a regra de Bruun. Para os restantes tipos de litoral – arriba, praias de cascalheiras, etc. – aos quais não se aplicam modelos gerais de erosão e cuja história erosiva será variável de local para local, analisou-se apenas, e de forma qualitativa, a sua susceptibilidade à erosão face à exposição à ondulação dominante.

➤ **Praias de Areia** – A praia de areia verdadeiramente significativa na ilha Terceira é a Praia da Vitória; outras pequenas praias tendem a ser pouco mais do que fina cobertura arenosa dum substrato consolidado, não se comportando como praias de areia típicas face à erosão mas mais como litorais de natureza coesiva. Partindo do pressuposto de que para a praia significativa da ilha Terceira se pode aplicar a regra de Bruun, e verificando que na generalidade dos casos a que tem sido aplicada, esta regra indica recuos da linha de costa entre 50 a 200 vezes o valor da subida do nível mar, na ausência de outros dados, consideraram-se duas condições extremas de evolução do litoral:

- **Condição A** – O recuo da linha de costa, provocado pela erosão, é 50 vezes o valor da subida do nível do mar;
- **Condição B** – O recuo da linha de costa, provocado pela erosão, é 200 vezes o valor da subida do nível do mar.

Cruzando estas duas condições extremas de recuo do litoral com os cenários de variação do nível do mar obtidos a partir dos marégrafos chega-se a valores de recuo da linha de litoral para os Açores ao fim de 100 anos (Quadro 1.10):

Quadro 1.10 – Valores de Recuo de Linha de Costa para os Cenários de Subida do Nível do Mar Adoptados para os Açores ao Fim de 100 Anos

Cenários de subida do nível do mar	Variação do nível do mar		Condição A (m)		Condição B (m)	
	Anual (mm/ano)	Ao fim de 100 anos (m)	Anual (mm/ano)	Ao fim de 100 anos (m)	Anual (mm/ano)	Ao fim de 100 anos (m)
<i>Cenário 1</i>	15,22	+ 1,52	- 761	- 76	- 3044	- 304
<i>Cenário 2</i>	5	+ 0,50	- 250	- 25	- 1000	- 100
<i>Cenário 3</i>	1,5	+ 0,15	- 75	- 7,5	- 300	- 30
<i>Cenário 4</i>	0,5	+ 0,05	- 25	- 2,5	- 100	- 10
<i>Cenário 5</i>	- 0,5	- 0,05	Não calculado	Não calculado	Não calculado	Não calculado
<i>Cenário 6</i>	- 5	- 0,50	Não calculado	Não calculado	Não calculado	Não calculado
<i>Cenário 7</i>	- 8	- 0,80	Não calculado	Não calculado	Não calculado	Não calculado

O sinal – que afecta os números nos Cenários 5, 6 e 7 indicam descida do nível do mar, condição para a qual não se aplica a regra de Bruun

No Quadro 1.11 é indicada a percentagem de recuo de linha de costa para a Praia da Vitória.

Quadro 1.11 – Taxa de Recuo da Linha de Costa para Praia da Vitória (Ilha Terceira)

Praia	Taxa de Recuo da Linha de Costa (%)							
	Condição A				Condição B			
	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
Praia da Vitória	50	17	5	1,7	100	67	20	6,7

No caso das **condições mais catastróficas**, virtualmente toda a praia desaparece. Para as **condições catastróficas intermédias** (subida do nível do mar de 0,5 m em 100 anos e recuo de litoral entre 25 a 100 m) a perda pode variar entre 17 e 67%. Para as **condições mais favoráveis** (recuos de linha de costa entre 2,5 e 10 m) as o recuo da linha de costa é reduzido e a perda de área de praia (dado esta não poder migrar para o interior) relativamente reduzida. Sendo as praias de areia com maior susceptibilidade à erosão e à subida do nível do mar as que apresentam perfil de baixo pendente, largura reduzida e ausência de dunas (SURVAS, 2000), as praias de areia dos Açores são praias em risco.

➤ **Litoral de Arriba** – A resposta das arribas está fortemente dependente da sua litologia/consolidação, planos de fraqueza estrutural, densidade da fracturação, e direcções de ondulação que a atingem, em especial as ondulações de tempestade, e sabendo-se que as direcções preferenciais de ondulação nos Açores são (Quadro 1.12):

Quadro 1.12 – Direcções Preferenciais da Ondulação nos Açores

Tipo de Ondulação	Orientação
Ondulação Normal Média	Quadrante W, com predomínio da direcção SW
Furacões e Tempestades Tropicais mais Dissipadas (*)	Orientação inicial de W, passando a S e terminando a E (evolução que se verifica no espaço de algumas horas)

(*) extremamente agressivas para a orla costeira

vem que as arribas mais afectadas pelo aumento da erosão devido à subida do nível do mar orientam-se a W, SW e S, mas no estado actual dos conhecimentos não é possível determinar as respectivas taxas de recuo. Considerando as litologias em especial do sector basal, determinante na evolução da arriba, admite-se que as arribas compostas na sua totalidade ou na sua base por piroclastos pouco coerentes ou outros materiais friáveis serão no geral as que poderão apresentar, para o mesmo tipo de orientação face à ondulação, maiores taxas de recuo ao passo que as lavas muito sãs terão as taxas de recuo mais baixas e as lavas escoriáceas e com abundantes tubos de lava valores intermédios, como se pode ver no Quadro 1.13:

Quadro 1.13 – Susceptibilidades das Arribas à Erosão em Função da Litologia da Região Basal e Orientação de Exposição das Arribas

Litologias		Orientação de Exposição das Arribas							
		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Lavas	Consolidadas e compactas	MPS	MPS	MPS	PS	PS	PS	PS	MPS
	Consolidadas, pouco fracturadas	PS	PS	PS	MS	mS	S	S	PS
	Consolidadas, muito fracturadas	mS	mS	mS	S	S	MTS	MTS	mS
	Pouco consolidadas, pouco fracturadas	mS	mS	mS	S	S	MTS	MTS	mS
	Pouco consolidadas, muito fracturadas	S	S	S	MTS	MTS	ES	ES	S
	Tubos de lava e lavas muito porosas	PS	PS	PS	mS	mS	S	S	PS
	Muito alteradas	MTS	MTS	MTS	ES	ES	ES	ES	MTS
Piroclastos	Consolidados e compactos	MPS	MPS	MPS	PS	PS	S	S	MPS
	Consolidados, pouco fracturados	PS	PS	PS	mS	mS	S	S	PS
	Consolidados, muito fracturados	mS	mS	mS	S	S	MTS	MTS	mS
	Pouco consolidados, pouco fracturados	mS	mS	mS	S	S	MTS	MTS	mS
	Pouco consolidados, muito fracturados	S	S	S	MTS	MTS	ES	ES	S
	Friáveis	MTS	MTS	MTS	ES	ES	ES	ES	MTS

ES – extremamente susceptível; MTS – Muito susceptível; S – susceptível; mS – medianamente susceptível; PS – pouco susceptível; MPS – muito pouco susceptível

Nas arribas mais susceptíveis é de admitir que o recuo provocado pela erosão devida à subida do nível do mar seja significativo.

➤ **Litoral de Praias de Calhau** – Por via de regra são pequenas enseadas relativamente abrigadas, excepto nas orientadas a W e SW onde o efeito das ondulas, em especial de tempestades, pode ser significativo. Thieler e Hammar-Klose (1999) consideram, no seu estudo do litoral atlântico dos EUA, que estas praias têm alta vulnerabilidade à erosão por efeito da subida do nível do mar. Nos Açores, devido à reduzida dimensão destas praias, o principal efeito a considerar é o deslocamento da linha de costa para cotas mais altas provocado directamente pela subida do mar, reduzindo-as ou fazendo-as desaparecer de todo, tanto mais que a sua localização na base de arribas não permite qualquer migração para o interior. Na ausência de modelos que permitam a avaliação da taxa de erosão destas praias, fez-se uma análise qualitativa da sua susceptibilidade à erosão em função da orientação à ondulação dominante (Quadro 1.14):

Quadro 1.14 – Susceptibilidades das Praias de Calhau à Erosão em Função da Orientação de Exposição das Praias de Calhau

Orientação de Exposição das Praias de Calhau							
N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
mS	mS	mS	S	S	MTS	MTS	mS

ES – extremamente susceptível; MTS – Muito susceptível; S – susceptível; mS – medianamente susceptível; PS – pouco susceptível; MPS – muito pouco susceptível

Não tendo sido possível, dados os conhecimentos existentes, calcular valores de taxas de erosão para os diferentes tipos de litoral, e portanto contabilizar a área de território emerso perdido para o mar, conhecimento necessário para avaliar os impactos da alteração do nível do mar sobre os aquíferos de base, foi necessário estabelecer cenários de potenciais perdas de território emerso. Como os únicos dados quantitativos, aproximados, foram definidos para os litorais de areia, considerou-se como limite superior o valor de 300 m, dado ser o máximo calculado para as praias de areia. Este valor aproxima-se também do máximo registado para o recuo medido da região dos Capelinhos (litoral complexo de praia de areias e arriba). Os cenários de menores perdas basearam-se nas taxas de erosão mais reduzidas obtidas para as praias de areia nas condições menos catastróficas. O conjunto de cenários de perda de terra emersa são:

- ❖ **Cenário A** – redução de área total emersa de 0,5%
- ❖ **Cenário B** – redução de área total emersa de 1%
- ❖ **Cenário C** – redução de área total emersa de 3%
- ❖ **Cenário D** – redução de área total emersa de 5%

Se se admitir que o aquífero de base tem uma área similar à área total emersa da ilha (pode na verdade ser de extensão inferior se se considerarem todas as áreas impermeas e como tal improdutivas), então a redução da sua área devido apenas à erosão provocada pela subida do nível do mar seria a indicada no Quadro 1.15, para cada um dos cenários acima:

Quadro 1.15 – Perda de Área dos Aquíferos de Base por Redução de Área Emersa

Área inicial	Cenário 1 - 0,5% Perda em Km ²	Cenário 2 - 1% Perda em Km ²	Cenário 3 - 3% Perda em Km ²	Cenário 4 - 5% Perda em Km ²
401	2,01	4,01	12,03	20,05

Comparando as taxas de erosão registadas actualmente por Borges (1995 e 2001) para litorais de areia no arquipélago dos Açores com as obtidas para os cenários de subida do nível do mar aqui admitidos para os Açores, verifica-se que estes cenários podem indicar incrementos da erosão até cerca de 11 vezes superiores aos registados. Tomando em conta os valores de subida do nível do mar apontados pelo IPCC (2001) para os cenários de não redução das emissões de gases de efeito de estufa – e que oscilam entre 30 e 50 cm até ao ano 2100 – de que o **Cenário 2** de subida do nível do mar aqui considerado se aproxima, o incremento de erosão face às medições actuais é cerca de 4 vezes mais elevado.

Considerando que a alteração do nível do mar tem os seguintes impactos sobre os aquíferos de base:

- ❖ **Efeitos devidos à erosão provocada pela subida do nível do mar** - que são de três tipos:
 - *Aumento do risco de intrusão salina em áreas actualmente protegidas* – ao colocar estas regiões em contacto directo com a interface água doce-água salgada, devido a avanço do meio marinho sobre áreas antes emersas.
 - *Diminuição da área do aquífero de base* – pela redução da área global da ilha, e que segundo o Quadro 1.15 poderá, para alguns cenários, ser significativa.

- *Desaparição e/ou submersão de pontos de água litorais* – pelo recuo do litoral os pontos de água situados nas áreas costeiras – nascentes, poços de maré – podem deixar de existir ou ficar submersos.
- ❖ *Efeitos devidos à exclusiva subida do nível do mar* – a subida do nível do mar desequilibra o equilíbrio hidrostático entre a água doce e a água salgada, levando ao deslocamento da interface água doce/água salgada para o interior dos aquíferos, originando **intrusão salina**, ou agravando-a, caso já exista tal situação no aquífero afectado.

A avaliação destes impactos é de extrema importância para a definição das susceptibilidades dos aquíferos às alterações do nível do mar e, deste modo, a sua vulnerabilidade às alterações climáticas. Com base na análise dos cenários de alteração do nível do mar e respectiva erosão associada, aqui apresentados, são definidos no Capítulo 7 da tese um conjunto de quadros com a indicação das áreas mais susceptíveis à intrusão salina, pontos de água ameaçados pela subida do nível do mar e outros aspectos relacionados com os impactos da alteração do nível do mar sobre os aquíferos de base. Este conjunto de análises integra o desenvolvimento da metodologia de vulnerabilidade dos aquíferos às alterações climáticas, apresentado no Capítulo 10.

ANEXO 2. CORRESPONDÊNCIA ENTRE AS UNIDADES AQUÍFERAS DE NOVO *ET AL.* (2001) E OS SISTEMAS AQUÍFEROS DE DROTRH E IA (2001)

Ilha	Sistema Aquífero (Plano Regional da Água – DROTRH e IA, 2001)	Sistema Aquífero (Novo et al., 2001)
Terceira	Serra de Santiago	Santa Rita
	Graben	Ramo Grande-Lajes
	Ignimbritos das Lajes	
	Serra do Cume	Serra do Cume
	Ribeirinha	Serra da Ribeirinha
	Caldeira Guilherme Moniz-São Sebastião	Cabrito
		Cinco Picos
	Central	Vertente Sul de Guilherme Moniz-Pico Alto
	Labçal-Quatro Ribeiras	Vertente Norte de Guilherme Moniz-Pico Alto
	Biscoitos-Terra Chã	Inclusa na Unidade de Base
	Santa Bárbara Superior	Santa Bárbara
	Santa Bárbara Inferior	
	<i>Não individualizada</i>	Unidade de Base

