



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL

DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E AMBIENTE  
Núcleo de Águas Subterrâneas

Proc. 0607/14/16624

## **SUBSIN – UTILIZAÇÃO DO INSAR NA DETECÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE SUBSIDÊNCIA E DESLIZAMENTOS DO SOLO NA REGIÃO DE LISBOA: COMPONENTE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS**

**Referência do projecto n.º PTDC/CTE-GEX/65261/2006**

**Segundo relatório de progresso referente à análise DPSIR (Driving Forces-  
-Pressures-State-Impact-Responses) e à modelação de subsidência do caso  
de estudo em Vialonga**

Estudo realizado para: FCT Fundação para a Ciência  
e a Tecnologia, Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino  
Superior

Lisboa • Janeiro de 2010

**I&D** HIDRÁULICA E AMBIENTE

**RELATÓRIO 6/2010 – NAS**





MINISTÉRIO DAS OBRAS PÚBLICAS, TRANSPORTES E COMUNICAÇÕES  
Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I.P.

**Departamento de Hidráulica e Ambiente**  
Núcleo de Águas Subterrâneas

**Proc. 0607/14/16624**

**SUBSIN – UTILIZAÇÃO DO INSAR NA DETECÇÃO E CARACTERIZAÇÃO  
DE SUBSIDÊNCIA E DESLIZAMENTOS DO SOLO NA REGIÃO DE  
LISBOA: COMPONENTE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS**

**Referência do projecto nº PTDC/CTE-GEX/65261/2006**

**Segundo relatório de progresso referente à análise DPSIR (Driving Forces-  
Pressures-State-Impact-Responses) e à modelação de subsidência do caso de  
estudo em Vialonga**

**Equipas do projecto:**



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL



**Lisboa, Janeiro 2010**

Estudo realizado para:

**FCT** Fundação para a Ciência e a Tecnologia  
MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E ENSINO SUPERIOR



**SUBSIN – UTILIZAÇÃO DO INSAR NA DETECÇÃO E CARACTERIZAÇÃO  
DE SUBSIDÊNCIA E DESLIZAMENTOS DO SOLO NA REGIÃO DE  
LISBOA: COMPONENTE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS**

**Referência do projecto nº PTDC/CTE-GEX/65261/2006**

**Segundo relatório de progresso referente à análise DPSIR (Driving Forces-  
Pressures-State-Impact-Responses) e à modelação de subsidência do caso de  
estudo em Vialonga**

**SUBSIN - INSAR DETECTION AND CHARACTERIZATION OF  
SUBSIDENCE AND LANDSLIDES IN THE LISBON REGION:  
GROUNDWATER COMPONENT**

**Project Ref. N. PTDC/CTE-GEX/65261/2006**

**Second progress report concerning the DPSIR (Driving Forces -Pressures - State -  
Impact-Responses) assessment and the land subsidence modelling of the  
Vialonga case study**



# **SUBSIN – UTILIZAÇÃO DO INSAR NA DETECÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE SUBSIDÊNCIA E DESLIZAMENTOS DO SOLO NA REGIÃO DE LISBOA: COMPONENTE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS**

## **RESUMO**

O presente relatório descreve os trabalhos realizados pelo Núcleo de Águas Subterrâneas do Departamento de Hidráulica e Ambiente do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (NAS/DHA/LNEC) em colaboração com o Instituto de Engenharia de Estruturas Território e Construção do Instituto Superior Técnico (ICIST-IST), no âmbito do projecto “SUBSIn – Utilização do InSAR na detecção e caracterização de subsidência e deslizamentos do solo na região de Lisboa”. O projecto encontra-se em curso para a Fundação para a Ciência e a Tecnologia com fim previsto para 2010.

Este segundo relatório de progresso da componente de águas subterrâneas do projecto SUBSIn refere-se à análise DPSIR (Driving Forces-Pressures-State-Impact-Responses) e à modelação de subsidência do caso de estudo em Vialonga.

Inicialmente são analisadas as componentes da metodologia DPSIR nos casos de estudo de Lisboa, com especial enfoque para a questão das respostas ao problema da subsidência. De seguida é apresentado um capítulo dedicado à modelação do fluxo da água subterrânea e à modelação da subsidência de terrenos no caso de estudo em Vialonga.

Como conclusões principais da componente “Águas Subterrâneas do projecto SUBSIn” verifica-se que o estudo metodológico desenvolvido permitiu uma boa caracterização, análise (com auxílio da metodologia DPSIR) e modelação dos casos em estudo na zona da Grande Lisboa e servirá de base/auxiliar em outros estudos ou projectos que envolvam a modelação de subsidência de terrenos devido à exploração não sustentável de água subterrânea.

## ABSTRACT

This report describes the work developed by the Groundwater Division of the National Laboratory for Civil Engineering (NAS/DHA/LNEC), together with the Institute of Structure Engineering, Territory and Construction, of the Technical Superior Institute (ICIST-IST), on the scope of the project entitled "SUBSIn - InSAR detection and characterization of subsidence and landslides in the Lisbon region". The project is currently on going for the Foundation for Science and Technology until the end of 2010.

This second progress report refers to the groundwater component. It contains a DPSIR (Driving Forces-Pressures-State-Impact-Responses) assessment, as well as subsidence analysis at the Vialonga case study.

The DPSIR methodology components are applied to the Lisbon case studies, focusing on the responses that can be adopted regarding land subsidence. Also it is presented a section both on groundwater flow and land subsidence modeling at Vialonga case study.

The main conclusions of the "SUBSIn Project Groundwater" component state that the applied methodology allowed a good characterization, analysis (developed according to the DPSIR methodology) and modeling of the Lisbon case studies. The proposed methodology can be also useful in other studies or projects that include modeling of land subsidence due to groundwater unsustainable exploitation.

## RESUME

Ce rapport contient une description des travaux développés par la Division des Eaux Souterraines du Département d'Hydraulique et Environnement du Laboratório Nacional de Engenharia Civil (NAS/DHA/LNEC) en collaboration avec l'Institute de Génie des Structures du Territoire et Construction de L'Instituto Superior Técnico (ICIST-IST), dans le cadre du projet "SUBSIn – Utilisation de l'InSAR pour la détection et la caractérisation de la subsidence et glissement de terrains dans la région de Lisbonne". Le projet sera développé pour la Fondation pour la Science et la Technologie de Portugal jusqu'en 2010.

Ce deuxième rapport de progrès présente la composante des eaux souterraines du projet SUBSIn tout en comprenant la méthodologie d'analyse DPSIR (Driving Forces-Pressures-State-Impact-Responses) et la modélisation de la subsidence appliquées au cas d'étude de Vialonga.

Premièrement, on a analysé les composants de la méthodologie DPSIR aux cas d'étude de Lisbonne, tout en soulignant la réponse aux problèmes de la subsidence. Lors de cette analyse, on a présenté un chapitre dédié à la modélisation de l'écoulement de l'eau souterraine et à la modélisation de la subsidence des terrains pour le cas d'étude de Vialonga.

Comme conclusion, l'analyse de la "composante des eaux souterraines du projet SUBSIn" a permis de vérifier que l'étude méthodologique développée a permis de faire une bonne caractérisation, analyse (avec l'aide de la méthodologie DPSIR) et modélisation des cas d'étude de la zone de Lisbonne et cela servira comme une base pour aider à d'autres études ou projets sur la modélisation de la subsidence des terrains causée par l'exploitation non durable des eaux souterraines.

## **AGRADECIMENTOS E COLABORAÇÕES**

Agradece-se a colaboração da Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional de Lisboa e Vale do Tejo (CCDR – Lisboa e Vale do Tejo) pelos dados fornecidos da região de Vialonga.

Agradece-se ao Professor Albino Medeiros da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, a consulta de relatórios de pesquisa e captação de água da zona em estudo e as discussões sobre a hidrogeologia da zona de Vialonga.

Agradece-se ao Doutor João Carvalho do INETI o fornecimento dos dados de sísmica de reflexão e, ainda, da sua tese de Doutoramento em formato PDF.

## ÍNDICE DO TEXTO

1 INTRODUÇÃO .....	1
2 METODOLOGIA DPSIR (DRIVING FORCES-PRESSURES-STATE-IMPACT-RESPONSES) .....	2
2.1 Introdução ao capítulo .....	2
2.2 Metodologia DPSIR aplicada à subsidência nas zonas em estudo.....	3
2.2.1 Forças Motrizes (D) e Pressão (P).....	3
2.2.2 Estado (S).....	4
2.2.3 Impacte (I) .....	4
2.3 Resposta (R) .....	5
2.3.1 Introdução à resposta do problema.....	5
2.3.2 Hipóteses de respostas para as consequências da subsidência .....	6
2.3.3 Hipóteses de medidas de mitigação da compressão do material geológico.....	7
3 APLICAÇÃO DA MODELAÇÃO DE SUBSIDÊNCIA AO CASO DE ESTUDO EM VIALONGA.....	9
3.1 Introdução ao capítulo .....	9
3.2 Passos temporais da modelação .....	10
3.3 Simplificações para o desenvolvimento do modelo matemático .....	10
3.4 Configuração das camadas do modelo .....	11
3.5 Dados de entrada gerais .....	12
3.5.1 Propriedades dos materiais geológicos.....	12
3.5.2 Dados de fronteira .....	14
3.6 Resultados da corrida do modelo em estado estacionário.....	15
3.7 Corrida do modelo em regime transitório desde o ano de equilíbrio (1966) até ao ano de início de registos de subsidência (1993) .....	16
3.7.1 Dados de entrada (captações) .....	16
3.7.2 Dados de calibração (nível piezométrico) .....	17
3.7.3 Resultados.....	18
3.8 Corrida do modelo em regime transitório desde o ano de início de registos de subsidência (1993) até ao ano de fim de registos de subsidência (2007).....	20
3.8.1 Dados de entrada (captações) .....	20
3.8.2 Dados de entrada para a subsidência.....	21
3.8.3 Resultados.....	22
3.9 Corrida do modelo em regime transitório para quatro cenários futuros (2004-2015) .....	26
3.9.1 Resultados de subsidência na modelação de cenários futuros .....	26
3.9.2 Análise comparativa sobre os cenários considerados .....	33
4 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	35
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	39
ANEXO I – PROGRAMA DA REUNIÃO TÉCNICA COM O PROFESSOR JAIME CABRAL (UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO, BRASIL) EM PORTUGAL .....	41

ANEXO II – RESULTADOS DA REUNIÃO TÉCNICA COM O PROFESSOR JAIME CABRAL (UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO, BRASIL) EM PORTUGAL .....	42
ANEXO III – POSTER DO WORKSHOP “CONTRIBUTOS PARA O CONHECIMENTO DA COOPERAÇÃO CIENTÍFICA PORTUGUESA EM ÁGUAS SUBTERRÂNEAS COM ANGOLA E COM BRASIL.....	43
ANEXO IV – VARIAÇÃO DO NÍVEL PIEZOMÉTRICO (EM METROS) AO LONGO DO TEMPO EM VÁRIOS PONTOS DA REGIÃO – CORRIDA DO MODELO DE 1966 A 1993.....	44
ANEXO V – COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES PIEZOMÉTRICOS OBSERVADOS E OS VALORES CALCULADOS EM TRÊS FUIOS – VALORES DE 25-06-1993.....	45
ANEXO VI – CURVAS DE NÍVEL PIEZOMÉTRICO NO DIA 24 DE JANEIRO DE 1990, NA QUINTA CAMADA DO MODELO.....	46
ANEXO VII – VARIAÇÃO DO NÍVEL PIEZOMÉTRICO (EM METROS) AO LONGO DO TEMPO EM VÁRIOS PONTOS DA REGIÃO – CORRIDA DE 1993 A 2006.....	47

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura conceptual da metodologia DPSIR (retirado de Terceiro, 2008) .....	3
Figura 2 – Exemplo ilustrativo da resolução design para a subsidência .....	6
Figura 3 – Exemplo ilustrativo da aplicação de Grouting .....	7
Figura 4 – Esquema ilustrativo de aplicação de “packers” em furos .....	8
Figura 5 – Área da zona modelada em Vialonga .....	12
Figura 6 – Visualização em perfil da condutividade da coluna 32 – As cores correspondem às unidade geológicas consideradas, ou seja, o azul escuro corresponde ao Quaternário, verde ao Miocénico, azul claro ao Oligocénico, cor-de-rosa ao Aptiano e vermelho ao Jurássico .....	13
Figura 7 – Visualização em planta da distribuição espacial da condutividade 32 – As cores correspondem às unidade geológicas consideradas, ou seja, o azul escuro corresponde ao Quaternário, verde ao Miocénico, azul claro ao Oligocénico, cor-de-rosa ao Aptiano e vermelho ao Jurássico .....	14
Figura 8 – Resultados do modelo em estado estacionário (nível piezométrico em metros e linhas de fluxo).....	15
Figura 9 – Localização, no modelo, dos furos considerados para o passo temporal de 1966 a 1993 .....	17
Figura 10 – Resultados em planta da corrida em estado transitório do passo temporal de 1966 a 1993 (nível piezométrico em metros e linhas de fluxo) (resultados da quinta camada e último dia de corrida).....	19
Figura 11 – Resultados da corrida em estado transitório do passo temporal de 1966 a 1993 (nível piezométrico em metros). A imagem à esquerda corresponde ao quadrado A da Fig. 10 e a imagem à direita ao quadrado B .....	19
Figura 12 – Localização, no modelo, dos furos considerados para o passo temporal de 1993 a 1966 .....	21
Figura 13 – Resultados em planta da corrida em estado transitório do passo temporal de 1993 a 2007 (nível piezométrico em metros e linhas de fluxo) (resultados da quinta camada e último dia de corrida).....	22
Figura 14 – Resultados da corrida em estado transitório do passo temporal de 1993 a 2007 (nível piezométrico). A imagem à esquerda corresponde ao quadrado A da Fig. 13 e a imagem à direita ao quadrado B .....	23
Figura 15 – Resultados espaciais da subsidência modelada com o pacote SUB no caso em estudo de Vialonga (velocidades médias anuais em mm / ano) .....	24
Figura 16 – Resultados espaciais da subsidência modelada com o pacote SUB em zonas específicas do caso em estudo e comparação com os valores de PSInSAR (velocidades médias anuais em mm / ano).....	25
Figura 17 – Subsidência do terreno na célula localizada na linha 63 e coluna 32, durante o período temporal de 1993 a 2007 .....	25
Figura 18 – Velocidades de subsidência modeladas para o Cenário 1 na zona de Vialonga .....	27
Figura 19 – Velocidades de subsidência modeladas para o Cenário 2 na zona de Vialonga .....	28
Figura 20 – Velocidades de subsidência modeladas para o Cenário 3 na zona de Vialonga .....	29
Figura 21 – Velocidades de subsidência modeladas para o Cenário 4 A na zona de Vialonga.....	30
Figura 22 – Velocidades de subsidência modeladas para o Cenário 4 B na zona de Vialonga.....	31
Figura 23 – Velocidades de subsidência modeladas para o Cenário 4 C na zona de Vialonga .....	32
Figura 24 – Comparação de velocidades médias anuais de subsidência entre o cenário 4C (2007 a 2015) e o período temporal de 1993 a 2007 .....	33
Figura 25 – Gráfico do comportamento temporal para os vários cenários futuros (ponto na linha 66 e coluna 36) .....	34
Figura 26 – Gráfico do comportamento temporal para os cenários 3, 4A, 4B e 4C (ponto na linha 66 e coluna 36) .....	34

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Descrição das componentes do modelo DPSIR.....	2
Quadro 2 – Correspondência entre as unidades geológicas identificadas na carta geológica e as unidades geológicas consideradas para o modelo .....	11
Quadro 3 – Condutividade hidráulica horizontal no início do modelo.....	13
Quadro 4 – Condutividade hidráulica horizontal após calibração.....	13
Quadro 5 – Dados dos furos considerados para o passo temporal de 1966 a 1993.....	16
Quadro 6 – Valores de calibração na zona da Central de Cervejas.....	18
Quadro 7 – Valores de calibração para outros locais considerados no modelo.....	18
Quadro 8 – Dados dos furos considerados para a corrida do modelo no passo temporal de 1993 a 2007 .....	20
Quadro 9 – Valores de coeficiente de armazenamento específico elástico considerado para o modelo.....	22
Quadro 10 – Velocidades médias anuais de subsidência (célula da linha 66 e coluna 36) .....	34

# SUBSIN – UTILIZAÇÃO DO INSAR NA DETECÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE SUBSIDÊNCIA E DESLIZAMENTOS DO SOLO NA REGIÃO DE LISBOA: COMPONENTE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

## 1 INTRODUÇÃO

Este documento relata os trabalhos realizados pelo Núcleo de Águas Subterrâneas do Departamento de Hidráulica e Ambiente do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (NAS-LNEC) em colaboração com o Instituto de Engenharia de Estruturas Território e Construção do Instituto Superior Técnico (ICIST-IST), no âmbito do projecto “SUBSIn – Utilização do InSAR na detecção e caracterização de subsidência e deslizamentos do solo na região de Lisboa” (SUBSIn). O projecto é financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT - referência PTDC/CTE-GEX/65261/2006), sendo o IST a instituição proponente. O LNEC é parceiro no projecto, tendo o NAS ficado responsável pela componente de caracterização e modelação de águas subterrâneas (Tarefas 3 e 4 do projecto SUBSIn), cujos resultados se apresentam neste segundo relatório de progresso.

O projecto SUBSIn tem como principal objectivo a utilização de interferometria de imagem de radar de abertura sintética (InSAR convencional e PSInSAR) na detecção e caracterização de deformação do solo na zona da grande Lisboa. Após a detecção por InSAR (ou PSInSAR) é necessário proceder à caracterização e análise das zonas marcadas como problemáticas, tendo como principal objectivo a resolução do problema.

Este relatório está estruturado nos seguintes três capítulos, sendo o primeiro a introdução:

- O segundo capítulo apresenta uma análise com a metodologia DPSIR (Driving Forces-Pressures-State-Impact-Responses) aplicada aos casos de estudo na Grande Lisboa, com especial enfoque para a questão das respostas ao problema da subsidência;
- O capítulo seguinte corresponde à aplicação da modelação matemática do fluxo de água subterrânea e da subsidência de terrenos ao caso de estudo em Vialonga;
- Por fim, no capítulo terceiro, desenvolvem-se algumas conclusões e recomendações para a resolução do problema da subsidência.

O desenvolvimento do modelo, o aumento do conhecimento sobre subsidência de solos e, conseqüentemente, a elaboração do relatório contou com o forte apoio do consultor externo do projecto SUBSIn, o Professor Jaime Cabral, Professor Associado do Departamento de Engenharia Civil e Pesquisador do Grupo de Recursos Hídricos da Universidade Federal de Pernambuco no Brasil. O Professor Jaime Cabral apresenta um forte conhecimento e uma avançada experiência em subsidência de terrenos e nos seus métodos de monitorização, modelação e mitigação (cf. Cabral *et al.*, 2008). Em anexo são apresentados o programa de estadia da reunião técnica, que decorreu na semana de 2 e 6 de Fevereiro de 2009, entre o Professor Jaime Cabral e os investigadores do projecto SUBSIn (ANEXO I), os resultados obtidos desta reunião técnica (ANEXO II) e o poster do workshop “Contributos para o conhecimento da cooperação científica portuguesa em Águas Subterrâneas com Angola e com o Brasil” realizado no último dia da reunião técnica (ANEXO III) no LNEC.

## 2 METODOLOGIA DPSIR (DRIVING FORCES-PRESSURES-STATE-IMPACT-RESPONSES)

### 2.1 Introdução ao capítulo

A estrutura Driving Force – State – Response (DSR) foi adoptada em 1995 pela *United Nations Commission on Sustainable Development* (CSD) como ferramenta de organização de informação sobre desenvolvimento sustentável e para o desenvolvimento, apresentação e análise de indicadores de desenvolvimento sustentável (Mortensen, 1997).

Um maior desenvolvimento é apresentado com a metodologia DPSIR (Driving Forces-Pressures-State-Impact-Responses), que corresponde à estrutura DSR utilizada pela Agência Europeia do Ambiente – AEA (<http://www.eea.europa.eu/>) e pelo *Statistical Office of European Union* (EUROSTAT) com o objectivo principal de analisar problemas ambientais estabelecendo uma cadeia causal entre indicadores. As diferentes componentes da metodologia DPSIR estão descritas no Quadro 1.

Quadro 1 – Descrição das componentes do modelo DPSIR

<b>Força motriz (Driving Forces)</b>	Descreve como o desenvolvimento social, populacional e económico provoca alterações nos estilos de vida, níveis de consumo e modelos de produção.
<b>Pressão (Pressures)</b>	Descreve o tipo de pressões que são exercidas no ambiente e que têm origem na sociedade.
<b>Estado (State)</b>	Descreve quantitativa e qualitativamente os fenómenos físicos, biológicos e químicos.
<b>Impacte (Impact)</b>	Descreve como a pressão sobre o ambiente altera o estado desse mesmo ambiente. Estas alterações do ambiente exercem impactes sobre as funções sociais e económicas.
<b>Resposta (Response)</b>	Descreve como o indivíduo, a comunidade e os governos dão resposta às alterações do estado do ambiente, tentando impedir, compensar, melhorar ou adaptar-se a elas.

A AEA refere a metodologia DPSIR aplicada à análise de um sistema da seguinte forma:

- O desenvolvimento social e económico (força motriz) exerce pressão no ambiente e, conseqüentemente, altera o seu estado. Este leva a impactos vários, por exemplo na saúde humana, nos ecossistemas ou nos materiais, que deverão ter uma resposta imediata por parte da sociedade de acordo com a força motriz exercida, estado ou impacto, através de medidas adaptativas e/ou minimizadoras. Estas medidas (Respostas), ou acções, poderão ser de várias vertentes, e.g. políticas ou legais.

Esta conceptualização do problema pode “encorajar” e apoiar os decisores (*decision makers*), visto que os vários pontos de um problema são caracterizados numa corrente de causa-efeito, podendo esta ser “quebrada” ou alterada pela aplicação de correctas acções.

A Figura 1 representa, de forma esquemática, as relações entre as componentes DPSIR.

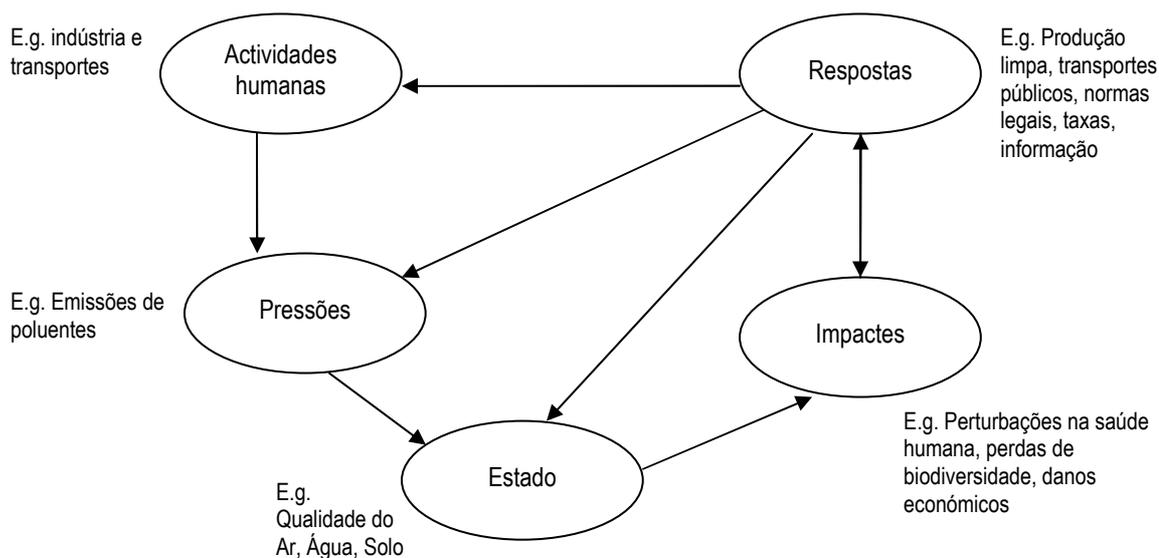


Figura 1 – Estrutura conceitual da metodologia DPSIR (retirado de Terceiro, 2008)

Segundo Mortensen (1997) a existência da distinção entre “força motriz” e “pressão” não se revela útil, para informação e indicadores direccionados para o desenvolvimento sustentável. A justificação do autor é que o conceito “pressão” não é um reflexo preciso dos impactes da actividade humana no desenvolvimento sustentável, que poderão ser positivos e/ou negativos.

Para uma determinada análise a AEA classifica os indicadores do seguinte modo (retirado de Terceiro, 2008):

- “Indicadores Descritivos – descrevem a situação actual do ambiente. São usados para descrever a relação entre o ambiente e a população, estando subdivididos em Força motriz, Pressão, Estado, Impacte, Resposta;
- Indicadores de Desempenho – são utilizados para comparar as condições reais com um conjunto de condições de referência, medindo a distância entre a situação ambiental existente e a desejada;
- Indicadores de Eco-Eficiência – indicam a eficiência dos produtos e processos em termos de recursos usados e de emissões e resíduos gerados por unidade de produto;
- Indicadores de Bem-estar – têm por objectivo integrar as dimensões económicas, sociais e ambientais como medida total do bem-estar.”

Desta forma, as componentes do DPSIR aplicadas aos casos de estudo de Lisboa serão analisadas neste capítulo, com especial enfoque para a questão das respostas ao problema da subsidência.

Visto que existe uma maior ligação entre o caso de estudo em Vialonga e a água subterrânea, neste capítulo dá-se maior enfoque sobre a análise dos indicadores DPSIR aplicados a essa zona.

## **2.2 Metodologia DPSIR aplicada à subsidência nas zonas em estudo**

### **2.2.1 Forças Motrizes (D) e Pressão (P)**

Para o caso das Laranjeiras não são claras as forças motrizes e as pressões que provocam o problema de subsidência. No primeiro relatório de progresso (Oliveira *et al.*, 2009, Secção 5.4.3.) já se

desenvolveu este tema propondo-se a necessidade de uma monitorização específica sobre os potenciais causadores do problema.

No caso de Vialonga verifica-se na caracterização do caso de estudo que as forças motrizes são os vários utilizadores de recursos hídricos presentes na região. Entre eles encontram-se indústrias de média dimensão que necessitam, por diferentes razões, de grandes volumes de água.

As pressões em Vialonga são os valores de volume de água retirados pelas empresas e que, segundo analisado em Oliveira *et al.* (2009), apresentavam-se em 1997 na ordem dos 800 mil metros cúbicos/ano para o caso das empresas de adubos e fertilizantes e de 600 mil metros cúbicos/ano pela fábrica de cervejas de Vialonga que pertence à SCC (dados do PBHRT, 2000).

### 2.2.2 Estado (S)

A subsidência de terrenos pode, na metodologia DPSIR, ser considerada um indicador de estado mas também um indicador de impacto, resultante da diminuição do nível piezométrico de água subterrânea (neste caso o rebaixamento elevado do nível piezométrico seria o estado).

Visto que a temática principal do projecto SUBSIn é a subsidência de terrenos e, por definição, o estado corresponde “aos fenómenos físicos, biológicos e químicos” ir-se-á considerar a sobreexploração de água subterrânea como uma pressão e como indicadores de estado os fenómenos do rebaixamento elevado do nível piezométrico e a compressão do material geológico (consequente subsidência de terrenos), apesar da ligação entre os dois fenómenos (Oliveira *et al.*, 2009).

Como foi analisado no capítulo 5 de Oliveira *et al.* (2009) a sobreexploração de água subterrânea produziu um elevado rebaixamento do nível piezométrico médio da região e esse rebaixamento é visível no histórico de nível piezométrico de furos de captação. O estado físico representativo da região, relativamente à subsidência de terrenos, foi analisado na Secção 5.2. de Oliveira *et al.* (2009), em Valadão *et al.* (2005), em Heleno *et al.* (2008) e na candidatura FCT ao projecto SUBSIn. De facto, as condições da subsidência de terreno na zona da Grande Lisboa foram as impulsionadoras para a candidatura do projecto SUBSIn.

### 2.2.3 Impacte (I)

Os impactes (consequências) causados pela compressão do material geológico (e consequente subsidência de terrenos) podem ser divididos em dois grandes grupos: 1) problemas imediatos e 2) problemas potenciais.

Como problemas imediatos verifica-se que o material geológico ao compactar, irreversivelmente, fica com menos espaços vazios que possam ser ocupados por água, i.e. diminui a sua porosidade. Desta forma, a compactação gera materiais geológicos com menor capacidade para transmitir e armazenar água.

Em termos estruturais verifica-se que os edifícios de grande área (e.g. fábricas) começam a ceder e a apresentar fendas nas paredes visto que a subsidência de terrenos não é feita de forma uniforme em toda a zona problemática. As estruturas com pouca área superficial (e.g. vivendas e prédios isolados) acompanham o terreno, como um todo, no seu rebaixamento.

Como problemas potenciais verifica-se que a destruição de edifícios de grandes dimensões poderá levar a uma destruição estrutural de tal forma elevada que o edifício poderá ficar inutilizável.

Outro grande problema que poderá surgir no futuro, e estará associado à subsidência, é o aumento da formação de cheias e todos os seus problemas associados, em zonas ribeirinhas ou costeiras.

As cheias na zona de Vialonga, durante elevados períodos de precipitação, podem estar associadas a dois factores principais:

- Baixa capacidade de escoamento da água para o rio Tejo;
- Aumento do caudal do rio Tejo.

Enquanto o primeiro factor pode ser resolvido com um correcto sistema de drenagem, o segundo apenas pode ser resolvido com barreiras ou a elevação dos edifícios atingidos. Este segundo factor é apenas potencial nas indústrias e populações que se encontram na zona aluvionar.

Desta forma, a subsidência poderá aumentar o problema de cheias na região visto que:

- a) Os sistemas de drenagem poderão ficar mal dimensionados para o novo declive de terreno provocado pela subsidência;
- b) O aumento do caudal do rio Tejo, e consequente cheia, passaria a ter maior impacto na zona se estas edificações diminuíssem a cota de base. Esta consequência é pouco provável para a fábrica da central de cervejas, que se encontra ao nível de ~25 m (~30m em alguns lugares) e com uma subsidência de velocidade de 0,013 m/ano e com a presença de três barreiras naturais de 70 m, 80 m e 50 metros entre a fábrica e o rio Tejo. No entanto, no caso de outras fábricas e habitações localizadas na zona aluvionar o risco é real, visto que o nível de terreno desta área é <10 m, e também estas se encontram a subsidir com velocidades de 0,01 m/ano nos últimos 15 anos.

## **2.3 Resposta (R)**

### *2.3.1 Introdução à resposta do problema*

As respostas aos problemas são, na actualidade, a maior preocupação no mundo científico, pois mais importante do que conhecer o problema é necessário saber que resoluções existem para esse mesmo problema, como podem ser aplicadas e se essas soluções serão as mais fiáveis.

Visto que este é um ponto importante, o relatório apresenta uma secção dedicada exclusivamente às respostas à subsidência, com particular ênfase aos casos em estudo.

A subsidência de terreno tem o problema de poder ser irreversível e, logo, não apresentar uma solução adequada mas medidas de mitigação ou medidas de resolução dos impactes da subsidência (mas não da própria subsidência). Esta característica deve-se ao facto da subsidência de terrenos em aquíferos ocorrer quando o rebaixamento do nível piezométrico conduz a uma pressão efectiva que é inferior ao valor de pressão de pré-consolidação passando o material a funcionar de forma plástica (ou inelástica) e logo incapaz de recuperar a sua forma após uma recuperação do nível piezométrico.

Outra característica da subsidência de terrenos é o facto de que a compressão do material geológico não cessar assim que é interrompida a pressão por parte do rebaixamento do nível da água. Ou seja, mesmo que o nível piezométrico estabilize o material continuará a comprimir (e o terreno a subsidir) até que nova estabilidade estrutural seja atingida.

Assim, existe uma enorme dificuldade de recuperação da forma do sistema aquífero após registo de subsidência de terrenos. Segundo o consultor externo do projecto (Professor Jaime Cabral), algumas técnicas foram utilizadas no Mundo com o intuito de forçar o material geológico à expansão (e consequente elevação do terreno), no entanto, estas técnicas exigiram um elevado dispêndio de energia e, por vezes, resultaram no colapso do material geológico.

Tendo em conta estes problemas associados à subsidência, verifica-se a necessidade de agir segundo “duas frentes”: a) Na resolução das consequências associadas à subsidência e b) na

mitigação da compressão do material fazendo com que o estado de equilíbrio estrutural seja atingido antecipadamente.

### 2.3.2 Hipóteses de respostas para as consequências da subsidência

Dos casos mundiais de subsidência analisados, e com informações do Professor Jaime Cabral, verificou-se que três consequências/impactes, anteriormente apresentadas, poderão ser mitigadas por soluções/respostas. As consequências referidas são: a) a destruição de estruturas de grande área (e.g. armazéns de fábricas) b) mau funcionamento do sistema de drenagem de água e c) alagamento (cheias) de zonas junto de rios e ribeiras (ver secção 2.2.3).

Como verificado anteriormente, a subsidência heterogénea do terreno tem efeito nas estruturas de grande área superficial visto que uma estrutura sólida é construída de forma a possuir um equilíbrio estrutural ligado ao solo. Se, por algum motivo, o material que sustentava as paredes ou pilares do edifício se deforma ou perde consistência, o edifício começa a ter fendas nas paredes levando, em última instância, à destruição total do edifício. No caso da subsidência de terrenos, as estruturas com pequena área superficial (pequenas moradias) não apresentam fendas nas paredes, pois estas acompanham o terreno.

O problema acima referido é o primeiro a ser identificado com a subsidência de terrenos e é, muitas vezes, denominado como “consequência estrutural” da subsidência. Para esta consequência existe uma solução utilizada, denominada de “resolução design” (cf. O site de Jim Canning & Partners Ltd., Consulting Civil Engineers - <http://www.jimcanning.com>), que visa a construção de um reforço estrutural nos pilares e nas paredes da edificação, ou na sua fundação, de modo a resistir aos esforços adicionais provocados pela deformação do solo. É necessário ter em conta que esta medida evita danos estruturais nas edificações, no entanto, a edificação continua a subsidir com o terreno (ver exemplo na Figura 2).

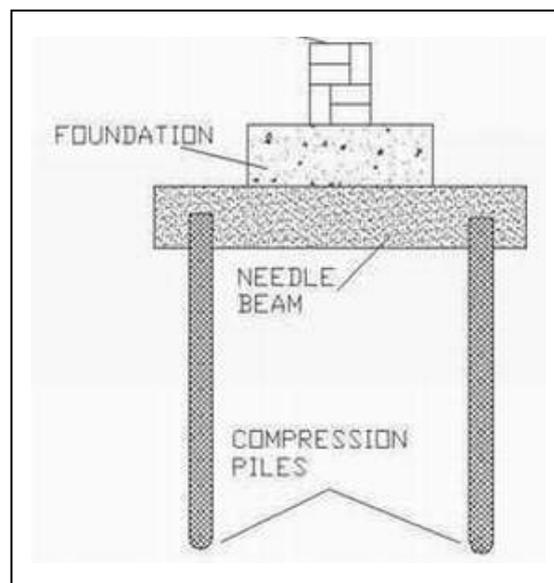


Figura 2 – Exemplo ilustrativo da resolução design para a subsidência

Outra solução apontada para casos de subsidência localizada e superficial, e seu consequente problema estrutural, é a injeção no solo de cimento (“Grouting” ou “Grout injection”, cf. O site de *Jim Canning & Partners Ltd., Consulting Civil Engineers*, cf. Figura 3). Esta técnica é utilizada em subsidência provocada pela criação de instabilidade existente durante a construção de túneis.

Se a subsidência para o caso de estudo na zona das Laranjeiras (Lisboa) for, de facto, superficial (devido à compactação dos aluviões, cf. Oliveira *et al.*, 2009) poderia ser aplicada a solução estrutural, apresentada anteriormente.

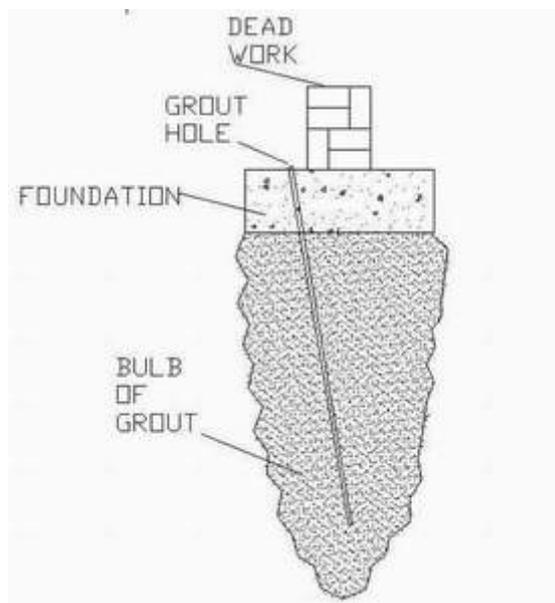


Figura 3 – Exemplo ilustrativo da aplicação de Grouting

Para o problema associado às cheias por mau dimensionamento do sistema de drenagem verifica-se que não existe uma medida adicional para este problema a não ser a melhoria constante dos sistemas de drenagem da zona rebaixada possibilitando o escoamento das águas pluviais até ao rio de forma a impedir que se forme uma zona alagada durante intensa precipitação.

As cheias provocadas pelo aumento do caudal do rio Tejo apenas poderão ser controladas se o caudal do rio Tejo for controlado a montante da zona afectada ou com a construção de uma barreira entre o rio e as fábricas e povoações que existem na zona aluvionar (nível de terreno inferior).

### 2.3.3 Hipóteses de medidas de mitigação da compressão do material geológico

As seguintes medidas apresentadas visam a mitigação do problema da subsidência para que o estado de equilíbrio estrutural dos materiais geológicos seja atingido antecipadamente. Estas medidas deverão ser consideradas como prioritárias face às medidas apresentadas na secção anterior.

A medida imediata ao problema de subsidência de terrenos devido à sobreexploração de água subterrânea é a redução do bombeamento de extracção, com recurso a fontes alternativas.

Existem, no entanto, outras medidas complementares e que serão apresentadas, analisadas e discutidas neste relatório, sendo estas três:

- a) Isolamento, nos furos, da captação nas zonas com maior compactação;
- b) Injecção de água por recarga artificial no meio;
- c) Sequestro e injecção de dióxido de carbono no meio;

O método de isolamento, nos furos, da captação nas zonas com maior compactação é, dos três apresentados, o método complementar de mitigação da subsidência mais vantajoso economicamente. Esta técnica passa por isolar os ralos dos furos que estejam no, ou adjacentes ao, material geológico que se encontra em maior compactação (este método é utilizado em situações de

poluição, cf. Canter *et al.*, 1985). O isolamento dessas zonas pode ser feita com a utilização de “packers” que são estruturas de borracha com uma pequena abertura para a passagem de canalização e que permite a isolamento de zonas de ralos que se considerassem mais aceitáveis (ver esquema na Figura 4). Para o caso de furos de grande diâmetro, ou a presença de várias zonas problemáticas, a solução poderá passar pela inserção de uma nova tubagem de diâmetro inferior com o seu devido dimensionamento.

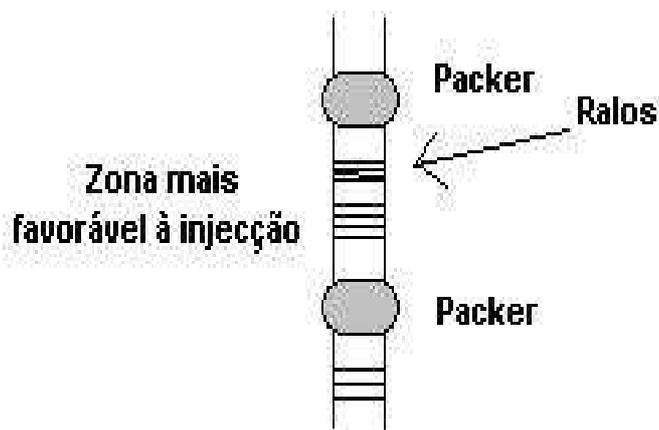


Figura 4 – Esquema ilustrativo de aplicação de “packers” em furos

A medida complementar de recarga artificial por injeção de água é uma solução aplicada em várias zonas do mundo com o intuito de aumentar a disponibilidade hídrica subterrânea, passando pela inserção forçada de água, proveniente de uma fonte exterior àquela região, na zona saturada do sistema aquífero. Vários projectos internacionais têm sido aplicados de forma a melhor compreender esta técnica. Para uma melhor compreensão desta técnica, suas vantagens e desvantagens, sugere-se a leitura de Oliveira (2007) e das várias publicações do projecto internacional GABARDINE do 6º Programa Quadro (cf. Site do GABARDINE - <http://www.gabardine-fp6.org/> e Lobo Ferreira *et al.*, 2007).

Visto que as camadas argilosas estão a subsidir de uma forma gradual a velocidade lenta, mesmo que cessasse toda a bombagem, a compactação continuaria. Desta forma, a injeção de água possibilitaria que o fim da compactação fosse atingido mais cedo (i.e. em vez de compactar durante décadas passaríamos a uma compactação de poucos anos)

É de realçar que não é possível fazer a injeção de água nas camadas que estão a subsidir visto que estas são, na generalidade, camadas argilosas com baixa transmissividade que não permite a recarga artificial. Assim, a solução passa por recarregar artificialmente nos materiais entre as camadas já compactadas, i.e., imediatamente acima ou imediatamente abaixo do material já compactado. De forma mais económica poderiam ser utilizados furos já existentes na área e que se encontrem abandonados ou inutilizados sendo, para isso, necessário a utilização de estruturas “packers” (cf. Figura 4) para uma injeção mais localizada.

Para este caso, a recarga artificial por injeção de água envolve o transporte de água desde uma origem longe do local até ao caso de estudo em Vialonga visto que a região se encontra no estuário do Tejo, i.e. água com características salobras.

Uma solução alternativa, mais complexa e dispendiosa passa pelo sequestro de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) da atmosfera e injeção no meio geológico. Esta técnica foi utilizada para o famoso

caso da plataforma de Ekofisk (extração de petróleo) (Jensen T.B. *et al.*, 2000) e consiste no sequestro, através de várias técnicas, de CO<sub>2</sub> da atmosfera e consequente injeção no subsolo.

Segundo o consultor externo do projecto SUBSIn (Professor Jaime Cabral) esta solução alternativa tem como principais vantagens:

- a) O aumento da pressão nas camadas colmatando a falta de pressão deixada pela ausência do fluido (água);
- b) O não enfraquecimento das estruturas geológicas;
- c) Permitir uma solução amiga do ambiente para a remoção do gás que está, possivelmente, a provocar o efeito de estufa.

E apresenta como principais desvantagens:

- a) A parte económica devido ao sequestro e transporte do CO<sub>2</sub> para o local de injeção;
- b) A necessidade de um estudo muito complexo sobre as reacções (químicas e de pressão) resultantes da inserção de CO<sub>2</sub>. Ou seja, a inserção de CO<sub>2</sub> poderia provocar alguma reacção indesejada com a água nativa.

Todas estas medidas necessitam dum profundo estudo de engenharia de forma a serem bem aplicadas e a conseguirem atingir o objectivo proposto.

### **3 APLICAÇÃO DA MODELAÇÃO DE SUBSIDÊNCIA AO CASO DE ESTUDO EM VIALONGA**

#### **3.1 Introdução ao capítulo**

Este capítulo pretende apresentar o objectivo principal da componente de águas subterrâneas do projecto SUBSIn, ou seja, a modelação do comportamento dos níveis piezométricos e, conseqüentemente, dos materiais geológicos à exploração de recursos hídricos nas zonas em estudo.

Assim, este capítulo apresenta a metodologia utilizada para o desenvolvimento de um modelo de análise do fluxo de água subterrânea e de subsidência do terreno do caso de estudo em Vialonga. Metodologia esta aplicada ao longo do projecto.

Os passos seguidos na metodologia foram os seguintes:

1. Desenvolvimento de um modelo conceptual simples do caso em estudo;
2. Corrida do modelo em estado estacionário, utilizando o programa MODFLOW e a interface Visual MODFLOW;
3. Corrida do modelo em estado transitório para os passos temporais previamente definidos com o programa atrás referido e o seu pacote de subsidência (SUB);
4. Calibração do modelo com dados reais;
5. Corrida do modelo em estado transitório para cenários futuros, com o programa atrás referido e o pacote SUB.

Dos passos acima enumerados verifica-se que o desenvolvimento do modelo conceptual tinha sido analisado e estudado no primeiro relatório de progresso (Oliveira *et al.*, 2009) e, como tal, apenas se considerarão neste capítulo os outros passos apresentados.

Este capítulo encontra-se dividido em: a) passos temporais considerados na modelação, b) simplificações para o desenvolvimento do modelo matemático, que corresponde às generalizações necessárias para corrida do modelo, c) configuração das camadas do modelo matemático, d) dados de entrada gerais para todos os passos temporais, e) resultados da corrida em estado de equilíbrio, f) corrida do modelo em estado transitório para o primeiro passo temporal considerado, com os devidos

dados de entrada específicos, de calibração e resultados obtidos, g) corrida do modelo no segundo passo temporal considerado e h) corrida do modelo para os cenários futuros propostos.

### **3.2 Passos temporais da modelação**

Os passos temporais da modelação considerados no modelo proposto tiveram em conta os dados de entrada e de monitorização disponíveis na região: dados de subsidência de terrenos e de extracção de água subterrânea e, ainda, o facto de se considerar que uma resposta é necessária para o problema.

Desta forma, é possível dividir-se a modelação em três períodos temporais: a) início do ano 1966 a 1993, b) início de 1993 a finais de 2006 e c) início de 2007 a 2015.

Os períodos escolhidos tiveram em conta os seguintes motivos:

a) Optou-se por 1966 pois foi a data em que se registou (segundo a CCDR de Lisboa e Vale do Tejo) o início de perfuração em profundidade na região;

b) O ano de 1993 foi quando se começaram a registar os dados em PSInSAR, que terminaram no final de 2006;

c) Escolheu-se o ano de 2015 pois é a data limite para o cumprimento da Directiva Quadro da água.

### **3.3 Simplificações para o desenvolvimento do modelo matemático**

O modelo conceptual e respectivas características dos meios foram apresentados na secção 5.5 de Oliveira *et al.* (2009). No entanto, estas características não são totalmente conhecidas e assim para se poder desenvolver um modelo matemático para o caso de estudo em Vialonga foi necessário ter em conta certas suposições:

1. Não existe um sistema aquífero devidamente definido na área (os mais próximos são os sistemas aquíferos da Bacia Tejo Sado e o sistema aquífero dos Aluviões do Tejo), apenas certos materiais que apresentam um potencial mais elevado de transmitir e armazenar água subterrânea. Assim, considera-se as camadas do modelo tendo em contas as unidades geológicas identificadas na carta geológica da região;
2. As unidades geológicas apresentam características hidráulicas relativamente uniformes e, como tal, considera-se valores médios;
3. Apesar de estarem identificadas sete unidades geológicas apenas se consideraram cinco zonas geológicas para o modelo (ver Quadro 2). Esta escolha deve-se à escala espacial considerada e teve como base de escolha o funcionamento, características e período de exploração de cada unidade geológica;
4. As várias falhas tectónicas a NE, a falha a Oeste da Fábrica de Cervejas de Vialonga (cf. Oliveira *et al.*, 2009) e a falha identificada por sísmica de reflexão (Carvalho *et al.*, 2008) permitem supor que o sistema se apresenta quase fechado, em termos hidráulicos, sendo considerados limites para o modelo. Poderá existir algum fluxo de água para dentro do sistema entre as falhas, no entanto, este fluxo não foi considerado no modelo. As falhas podem ter, ainda, outras influências no fluxo da água subterrânea funcionando, por exemplo, como zonas de fluxo preferencial (tal efeito não foi considerado no caso de estudo);

5. A camada da unidade do Jurássico não apresenta características para compactação e, pelo contrário, a camada do Oligocénico é a que apresenta maiores características de compactação, pois é a camada mais argilosa;
6. A condutividade hidráulica vertical de todos os meios geológicos é aproximadamente 10% da condutividade hidráulica horizontal;
7. O valor de recarga de água subterrânea é, aproximadamente, uniforme em quase toda a área;
8. Em termos de aplicação do pacote SUB considera-se que, para valores de entrada, não existem camadas com atraso na compactação pois o programa MODFLOW já considera um atraso temporal para o fluxo da água subterrânea.

Quadro 2 – Correspondência entre as unidades geológicas identificadas na carta geológica e as unidades geológicas consideradas para o modelo

<b>Unidades geológicas identificadas</b>	<b>Nome designado e considerado no modelo</b>
<b>Secundário</b> Urgoniano Jurássico	Jurássico
<b>Secundário</b> Aptiano – Albiano	Aptiano/Albiano
<b>Secundário</b> Cenomaniano <b>Terciário</b> Oligocénico	Oligocénico
<b>Terciário</b> Miocénico	Miocénico
<b>Quaternário</b>	Quaternário

### 3.4 Configuração das camadas do modelo

Tendo em conta a análise desenvolvida no capítulo 5 de Oliveira *et al.* (2009) é possível traçar como limites para o modelo a seguinte descrição, que pode ser acompanhada com a imagem da Figura 5:

- Como limite Oeste a falha presente na região (identificada na carta geológica e cujo traço passa junto aos furos 41 e 45 listados no Quadro 22 de Oliveira *et al.*, 2009) funciona como barreira;
- Como limite Noroeste considera-se uma falha localizada na Figura 22 de Oliveira *et al.*, 2009;
- Como limite Nor-nordeste considera-se a cumeada existente e prolonga-se o limite até ao rio Tejo;

- A Su-sudeste o limite considerado é dado pela falha identificada por sísmica de reflexão (Carvalho *et al.*, 2008 e secção 5.5.3. de Oliveira *et al.*, 2009);

Tendo em conta os limites traçados obtém-se uma área de modelação de 22,74 km<sup>2</sup>. Esta área foi dividida em 94 linhas e 75 colunas. Foram consideradas seis camadas de modelo referentes às cinco unidades geológicas, estando a unidade do Jurássico subdividida em duas camadas.

As camadas apresentam espessura variável conforme a sua localização e estas foram obtidas por interpolação de várias fontes (cf. Secção 5.5.5. de Oliveira *et al.*, 2009).



hidráulica elevada da unidade geológica do Quaternário esta apresenta, na área considerada, baixa capacidade para exploração de água subterrânea devido à sua espessura.

Quadro 3 – Condutividade hidráulica horizontal no início do modelo

Unidades geológicas consideradas no modelo	Condutividade Hidráulica Horizontal inicial (m/dia)
Quaternário	10
Miocénico	0,5
Oligocénico	0,00001
Aptiano	0,7
Jurássico	0,1

No entanto, estes valores de condutividade produziam, tendo em conta os valores para calibração no período temporal de 1966 a 1993, valores demasiado elevados de nível piezométrico na zona da Central de Cervejas. O estudo de sensibilidade levou à conclusão que a diminuição da condutividade hidráulica horizontal no modelo da camada do Aptiano produzia valores mais baixo de piezometria (e vice-versa). Assim, após uma calibração cuidada obteve-se o Quadro 4 que foi aplicado em todos os períodos temporais do modelo.

Quadro 4 – Condutividade hidráulica horizontal após calibração

Unidades geológicas consideradas no modelo	Condutividade Hidráulica Horizontal considerada (m/dia)
Quaternário	10
Miocénico	0,5
Oligocénico	0,000001
Aptiano	0,05
Jurássico	0,55

De notar que os valores de condutividade hidráulica foram calibrados tendo em conta a baixa quantidade de dados disponíveis.

A distribuição espacial da condutividade hidráulica horizontal está representada na Figura 6, numa imagem em perfil da coluna 32 do modelo e na Figura 7, numa imagem em planta do modelo.

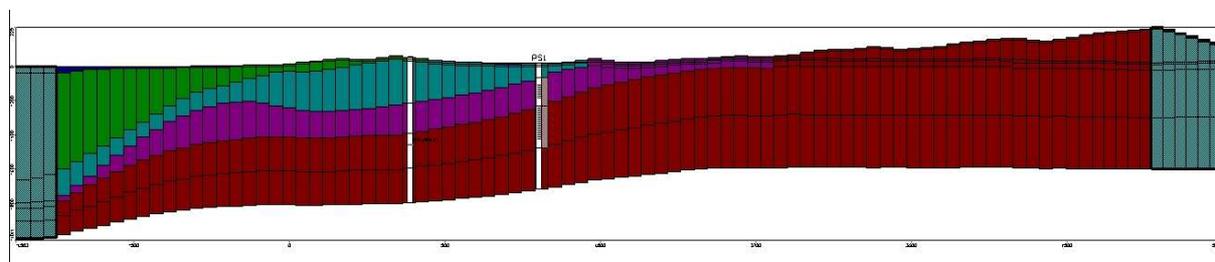


Figura 6 – Visualização em perfil da condutividade da coluna 32 – As cores correspondem às unidade geológicas consideradas, ou seja, o azul escuro corresponde ao Quaternário, verde ao Miocénico, azul claro ao Oligocénico, cor-de-rosa ao Aptiano e vermelho ao Jurássico

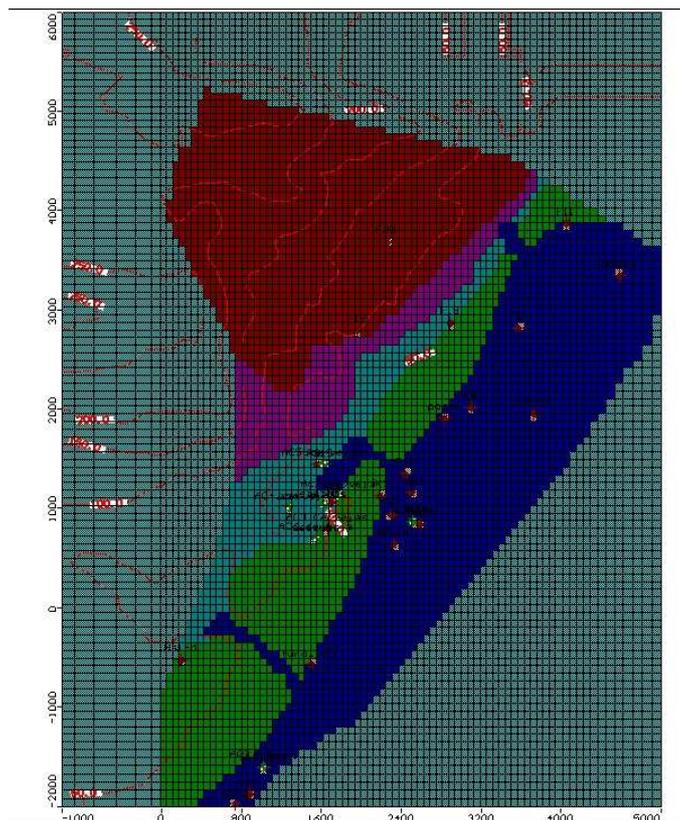


Figura 7 – Visualização em planta da distribuição espacial da condutividade 32 – As cores correspondem às unidades geológicas consideradas, ou seja, o azul escuro corresponde ao Quaternário, verde ao Miocénico, azul claro ao Oligocénico, cor-de-rosa ao Aptiano e vermelho ao Jurássico

Como referido anteriormente considerou-se que a condutividade hidráulica vertical era 10 % inferior à condutividade hidráulica horizontal.

Em ambas as figuras acima referidas as células cobertas por azul acinzentado são células inactivas.

### 3.5.2 Dados de fronteira

Os valores de fronteira considerados foram: a) recarga do meio, b) drenagem superficial e c) nível piezométrico constante.

Em relação à recarga do sistema foi necessário proceder a um pequeno estudo:

- O valor inicial considerado foi de 100 mm/ano que corresponde ao valor de recarga anual apresentado no PBH do rio Tejo (PBHRT, 2000) para o sistema hidrogeológico do Jurássico Superior da Região da Arruda dos Vinhos. No entanto este valor é demasiado elevado tendo em conta a precipitação e evapotranspiração real do local estudado, 600 mm/ano e 480 mm/ano, respectivamente (segundo o Atlas do Ambiente). Partindo da hipótese que nem todo o excedente (120 mm/ano) é utilizado para recarga e com uma taxa de infiltração nos 30% fixou-se a recarga em 30 mm/ano;

- No entanto esta recarga será válida para zonas com ocupação de solo não urbana. Em zonas muito urbanizadas considerou-se que a recarga era afectada de uma redução de 50 %;

- Outras presenças importantes são a da Auto-estrada A1 e dos grandes edifícios das empresas que tornam o piso quase impermeabilizado.

Resumindo, considerou-se para a recarga o valor de 15 mm/ano na zona Sul do modelo, 30 mm/ano na zona Norte e pontualmente o valor de 1 mm/ano na A1 e fábricas. Estes valores tiveram em conta a calibração do modelo.

A drenagem superficial foi aplicada na primeira camada do modelo considerando ribeiras da região.

Considerou-se, ainda, que junto ao Rio Tejo a piezometria era constante e foi dado como valor de fronteira para a primeira camada.

De notar que as falhas têm influência nas condições de fronteira do modelo, podendo funcionar como zonas de fluxo preferencial ou, no nosso caso, como barreiras ao fluxo da água subterrânea.

### 3.6 Resultados da corrida do modelo em estado estacionário

Após corrida do modelo em estado estacionário verifica-se que existe um acompanhamento do nível piezométrico com a altimetria do terreno da região, ou seja, decréscimo no sentido do rio Tejo (cf. Figura 8)



Figura 8 – Resultados do modelo em estado estacionário (nível piezométrico em metros e linhas de fluxo)

### **3.7 Corrida do modelo em regime transitório desde o ano de equilíbrio (1966) até ao ano de início de registos de subsidência (1993)**

#### **3.7.1 Dados de entrada (captações)**

Tendo em conta os dados fornecidos pela CCDR de Lisboa e Vale do Tejo e a visualização de relatórios de sondagens foi possível traçar o Quadro 5, associado à Figura 9, onde se apresentam vários dados sobre as captações consideradas para o modelo: a) nomes dos furos (por vezes, os furos não tinham nome na base de dados e logo considerou-se um nome fictício), b) onde estes estão localizados, c) qual o caudal recomendado para aquele furo, d) quando começou a extracção de água e e) qual foi o fim previsto da bombagem. Em relação a este último ponto é importante referir que não é possível saber a data exacta do fim da extracção de água subterrânea, no entanto, alguns relatórios de sondagens apresentavam informação referente à data de paragem de outros furos. Foi ainda possível traçar uma possível data de paragem dos furos analisando as datas de abertura de novos furos na mesma zona.

Quadro 5 – Dados dos furos considerados para o passo temporal de 1966 a 1993

<b>Nome</b>	<b>Localização</b>	<b>Início de bombagem</b>	<b>Fim de bombagem</b>	<b>Caudal recomendado (l/s)</b>
AC1	Central Cervejas	03-03-1966	1984	10
AC2	Central Cervejas	20-06-1966	1984	10
TD1	Central Cervejas	22-01-1981	1990	10,2
TD2	Central Cervejas	10-08-1986	1995	12,5
AC1	Soda Póvoa	03-03-1978	Indeterminado	5
AC2	Soda Póvoa	03-03-1978	Indeterminado	5
AC3	Soda Póvoa	27-06-1983	Indeterminado	5
Fab1	Aubos Alverca	28-08-1987	Indeterminado	5,6
HO-1A	Aubos Alverca	31-10-1989	Indeterminado	1,9
Fab5	Fábrica 5	01-03-1988	Indeterminado	4

Sempre que a data de fim de bombagem era considerada indeterminada modelou-se esse furo considerando que este extraía até ao final do período temporal de modelação.



Figura 9 – Localização, no modelo, dos furos considerados para o passo temporal de 1966 a 1993

Existem, ainda, alguns poços na região que foram identificados na carta geológica que data de 1980. Durante a visita de campo realizada em 2008 foi possível analisar que existem poços privados ainda em funcionamento. Para estes furos e poços considerou-se um caudal de extracção mínimo de 0,8 l/s.

Em relação aos ralos dos furos foram utilizados três métodos: i) quando se visualizou os relatórios de alguns furos apontou-se a localização exacta dos ralos, ii) quando apenas havia informação sobre o primeiro e último ralo considerou-se que em 50 % desse ralo contínuo (i.e. do primeiro ao último ralo) havia extracção e iii) quando não havia informação sobre a localização do ralo considerou-se o furo estava a extrair na zona mais produtiva.

A informação referente aos ralos de cada furo não é exposta devido a factores de confidencialidade.

### 3.7.2 Dados de calibração (nível piezométrico)

A calibração de um modelo de fluxo de água subterrânea é um processo de ajustamento dos parâmetros do modelo até se obter um valor adequado entre valores observados em campo e valores calculados pelo modelo.

Para este período temporal, visto que a informação PSInSAR começou em 1993, os dados de calibração considerados foram os valores de nível registados durante a construção dos furos ou registados em relatórios de sondagens e que foi possível ter acesso. Os seguintes quadros (Quadro 6 e Quadro 7) representam os valores de calibração registados e utilizados para a modelação do período temporal entre o ano de 1966 e o ano 1993.

Quadro 6 – Valores de calibração na zona da Central de Cervejas

<b>Furo</b>	<b>Ano</b>	<b>Nível piezométrico estático (m)</b>
<b>AC1</b>	03-03-1966	21
	25-06-1993	-44
<b>AC2</b>	20-06-1966	22,2
	25-06-1993	-37,8
<b>TD1</b>	22-01-1981	9,5
	19-07-1983	-5
	25-06-1993	-35,3
<b>TD2</b>	10-08-1986	-10,7
	25-06-1993	-35

Quadro 7 – Valores de calibração para outros locais considerados no modelo

<b>Furo</b>	<b>Ano</b>	<b>Nível piezométrico estático (m)</b>
<b>AC1</b>	03-03-1978	5
<b>AC3</b>	27-06-1983	3,68
<b>Fab1</b>	28-08-1987	2,2
<b>HO-1A</b>	31-10-1989	-0,35

### 3.7.3 Resultados

A Figura 10 representa uma vista em planta do nível piezométrico geral da água subterrânea na zona mais produtiva da região (quinta camada) no final da corrida, i.e. 25-06-1993.

A Figura 11 representa os resultados de duas das zonas mais afectadas pelo problema da subsidência. Na figura referida a imagem à esquerda corresponde à localização do quadrado A na imagem maior (Fig.10) e na segunda camada do modelo e a imagem à direita corresponde à localização do quadrado B na imagem maior (Fig.10) e à quinta camada do modelo.

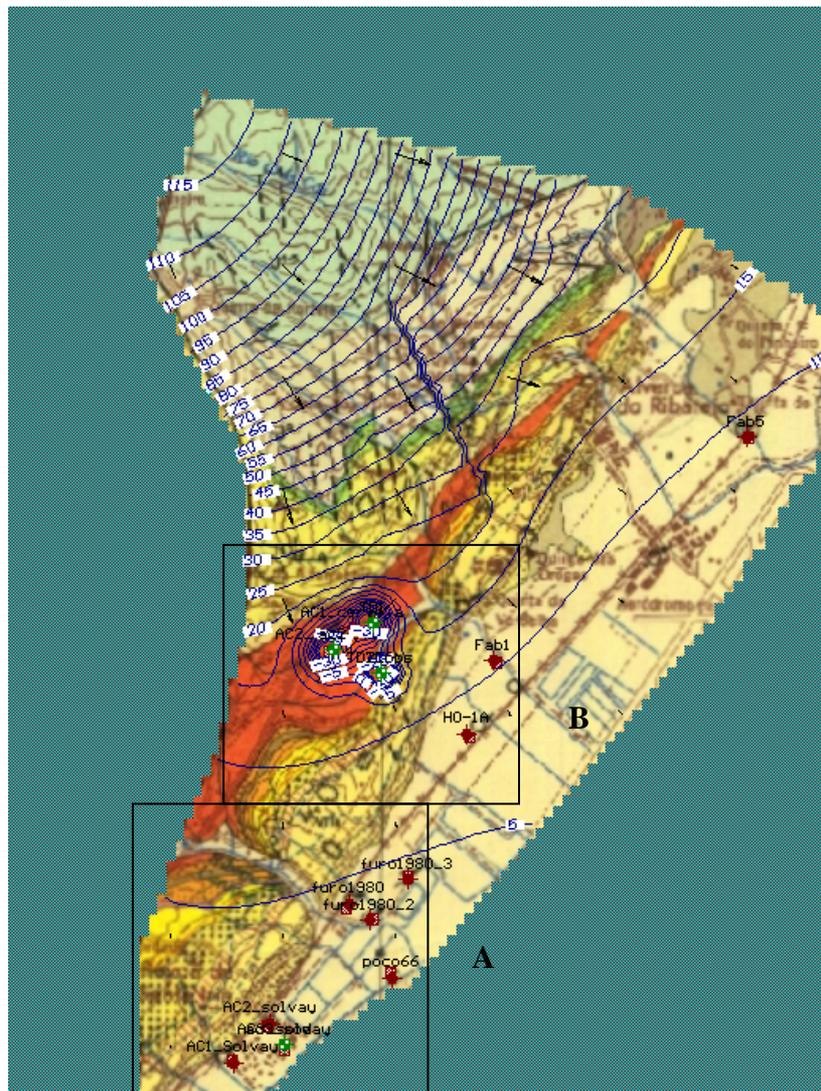


Figura 10 – Resultados em planta da corrida em estado transitório do passo temporal de 1966 a 1993 (nível piezométrico em metros e linhas de fluxo) (resultados da quinta camada e último dia de corrida)

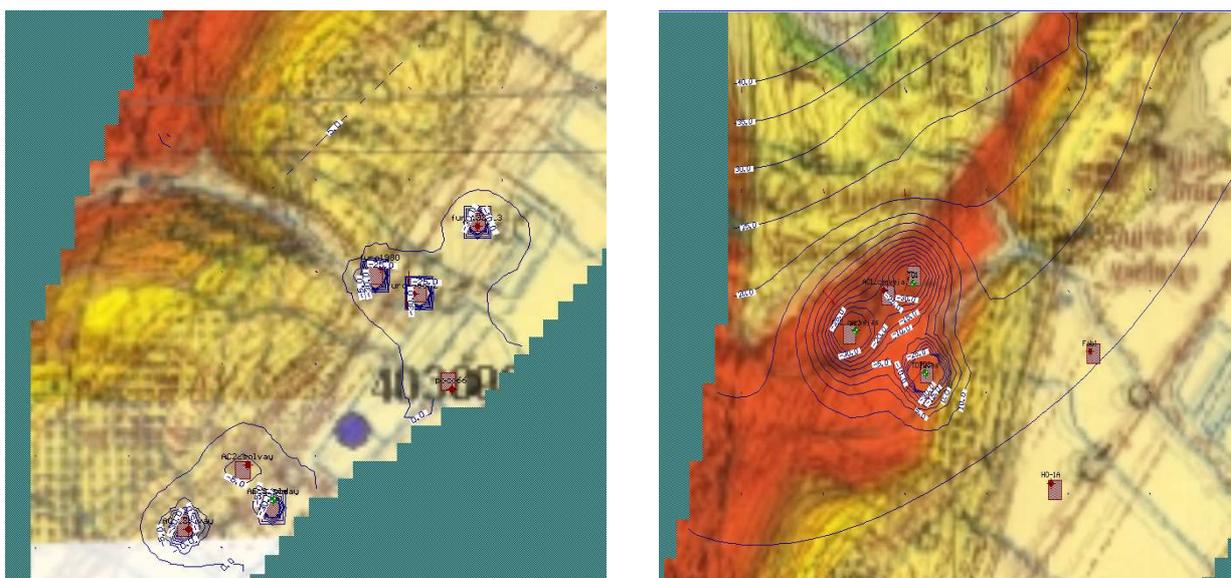


Figura 11 – Resultados da corrida em estado transitório do passo temporal de 1966 a 1993 (nível piezométrico em metros). A imagem à esquerda corresponde ao quadrado A da Fig. 10 e a imagem à direita ao quadrado B

Em anexo encontra-se um gráfico do comportamento temporal do nível piezométrico em vários pontos da região (ANEXO IV), a comparação em 25-06-1993 dos valores registados com os valores obtidos (ANEXO V) e uma imagem do resultado do nível piezométrico, em metros, no dia 24 de Janeiro de 1990 da corrida (ANEXO VI) na quinta camada.

### **3.8 Corrida do modelo em regime transitório desde o ano de início de registos de subsidência (1993) até ao ano de fim de registos de subsidência (2007)**

#### **3.8.1 Dados de entrada (captações)**

No Quadro 8 são apresentados os furos considerados para a modelação no período temporal de 1993 a 2007. Este quadro apresenta os nomes dos furos (por vezes, os furos não tinham nome na base de dados e logo considerou-se um nome fictício), onde estes estão localizados, qual o caudal recomendado para aquele furo, quando começou a extracção de água, qual foi o fim previsto da bombagem e qual era o nível piezométrico estático quando o furo foi construído.

Quadro 8 – Dados dos furos considerados para a corrida do modelo no passo temporal de 1993 a 2007

<b>Nome</b>	<b>Localização</b>	<b>Início de bombagem</b>	<b>Fim de bombagem</b>	<b>Caudal recomendado (l/s)</b>	<b>Nível à data da construção (m)</b>
Sol1	Solvay	07-06-1993	2006	7	Não disponível
Sol2	Solvay	09-08-2002	Indeterminado	13,3	0
SL3	Solvay	28-07-2006	Indeterminado	17,5	-0,81
HO3	Aubos Alverca	14-02-1994	2001	1,9	-12
JK3	Aubos Alverca	24-07-2001	Indeterminado	5	-38
JK1	Aubos Alverca	30-11-1994	Indeterminado	5,5	-15,9
JK2	Aubos Alverca	30-11-1994	Indeterminado	4	-31,5
F21	Aubos Alverca	16-01-2006	Indeterminado	4	-9
F8	Quinta das Drogas	28-09-1996	Indeterminado	0,5	Não disponível
Hs1-d	Quinta da Piedade	21-03-1996	Indeterminado	0,5	Não disponível
F2	Quinta do Galvão	12-04-1994	2001	8	-2
F15	Fabrica 15	10-10-2001	Indeterminado	2,2	-5
F19	Alto São Gerónimo	02-02-2004	Indeterminado	1,66	35
F11	Fabrica 11	21-08-2000	Indeterminado	8,3	8,3
F20	Urbanização	06-04-2004	Indeterminado	0,8	62
PS1	Central Cervejas	07-12-1995	1999	4	-42,9
SJSA1	Central Cervejas	01-04-1994	2001	4	Não disponível
AC4	Central Cervejas	29-03-1999	Indeterminado	5	-46,5
AC5	Central Cervejas	15-02-2001	Indeterminado	7	-24,3
AC6	Central Cervejas	29-08-2001	Indeterminado	11,2	-98
AC3	Central Cervejas	04-04-1997	2001	14	-68,8
AC7	Central Cervejas	07-10-2002	2006	7	-120,8

A Figura 12 permite fazer uma ligação entre os furos acima referidos e a sua localização espacial no modelo.



Figura 12 – Localização, no modelo, dos furos considerados para o passo temporal de 1993 a 1966

De referir que existem quatro furos que começaram a extrair dentro do período temporal anteriormente modelado (1966 a 1993) e que se considerou, para o modelo, continuarem a operar dentro deste período temporal. Os furos foram: i) TD2 na Central de Cervejas, ii) HO – 1A nos Adubos de Alverca, iii) Fab1 nos Adubos de Alverca e iv) AC3 na Solvay, com o fim de bombagem previsto em 1995, 2001, 1994 e 2002, respectivamente.

Tal como no período temporal modelado anteriormente, houve o cuidado de se manter os poços que abastecem pequenas habitações e que apresentam um caudal de extracção muito baixo.

### 3.8.2 Dados de entrada para a subsidência

Para este período temporal, visto já existirem dados de PSInSAR, modelou-se a subsidência de terrenos e como tal foi necessário proceder à entrada de dados para o pacote SUB.

Em relação aos dados de entrada necessários para o pacote SUB, e que foram anteriormente apresentados em Oliveira *et al.* (2009), verificou-se uma necessidade de simplificação devido à indisponibilidade de dados mais complexos.

Assim: a) considerou-se os valores padrão para as acelerações empíricas 1 e 2 (ver ANEXO I de Oliveira *et al.*, 2009), b) calculou-se o coeficiente de armazenamento específico elástico para cada unidade geológica, de acordo com as suas características e ábacos da especialidade, c) considerou-se que o coeficiente de armazenamento específico inelástico (ou plástico) era 100 vezes superior ao elástico, d) considerou-se um valor do nível de pré-consolidação igual a 0 e e) considerou-se um valor inicial de compactação de 0, de forma a medir a subsidência apenas naquele período.

Após calibração os valores de coeficiente de armazenamento específico elástico atribuídos ao modelo foram os apresentados no Quadro 9.

Quadro 9 – Valores de coeficiente de armazenamento específico elástico considerado para o modelo

Unidades geológicas consideradas no modelo	Coefficiente de armazenamento específico elástico (m/dia)
Quaternário	0,000054
Miocénico	0,00000012
Oligocénico	0,0000049
Aptiano	0,0000012
Jurássico	0,00000098

### 3.8.3 Resultados

No caso deste período temporal para além dos valores de nível à data de construção dos furos (cf. Quadro 8) existem os valores em PSInSAR que estão melhor distribuídos espacialmente e apresentam um grande grau de rigor. Desta forma a calibração foi feita de acordo com os valores PSInSAR.

#### a) Fluxo

A Figura 13 representa uma vista geral do nível piezométrico da água subterrânea na zona considerada mais produtiva da região, no final da corrida (i.e. 01-01-2007).

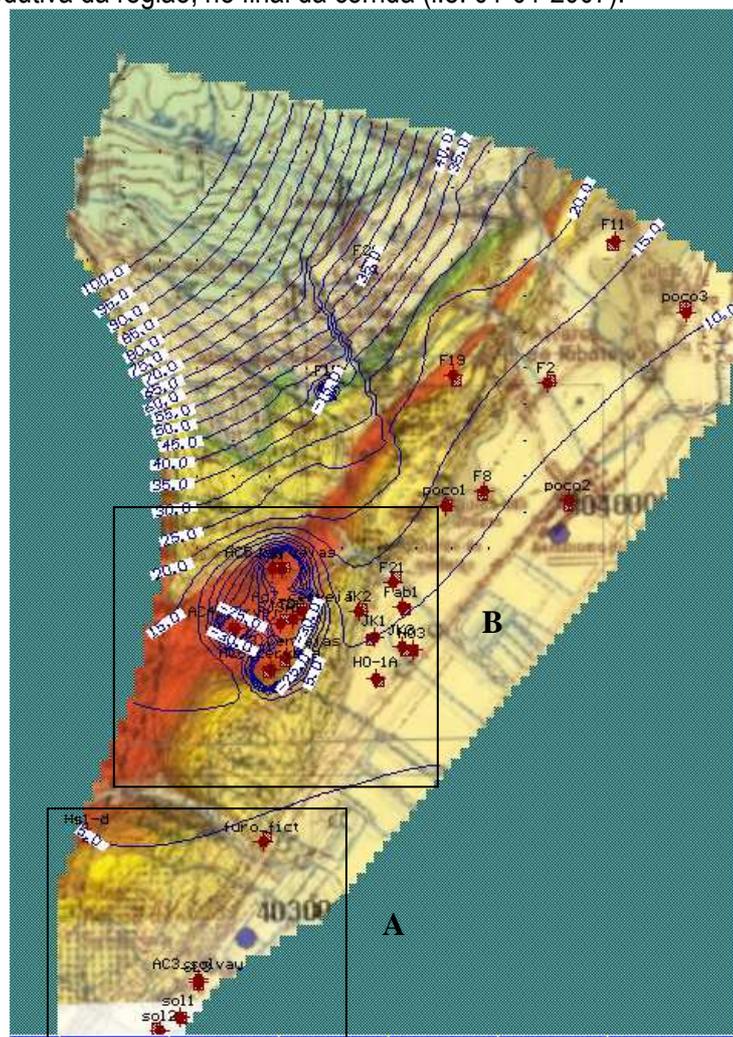


Figura 13 – Resultados em planta da corrida em estado transitório do passo temporal de 1993 a 2007 (nível piezométrico em metros e linhas de fluxo) (resultados da quinta camada e último dia de corrida)

A Figura 14 representa a visualização mais pormenorizada do nível piezométrico, no final da corrida, em zonas consideradas mais problemáticas. Na Figura 14 a imagem à esquerda corresponde à localização do quadrado A na imagem maior (Fig. 13) e na segunda camada do modelo e a imagem à direita corresponde à localização do quadrado B na imagem maior (Fig. 13) na quarta camada do modelo.

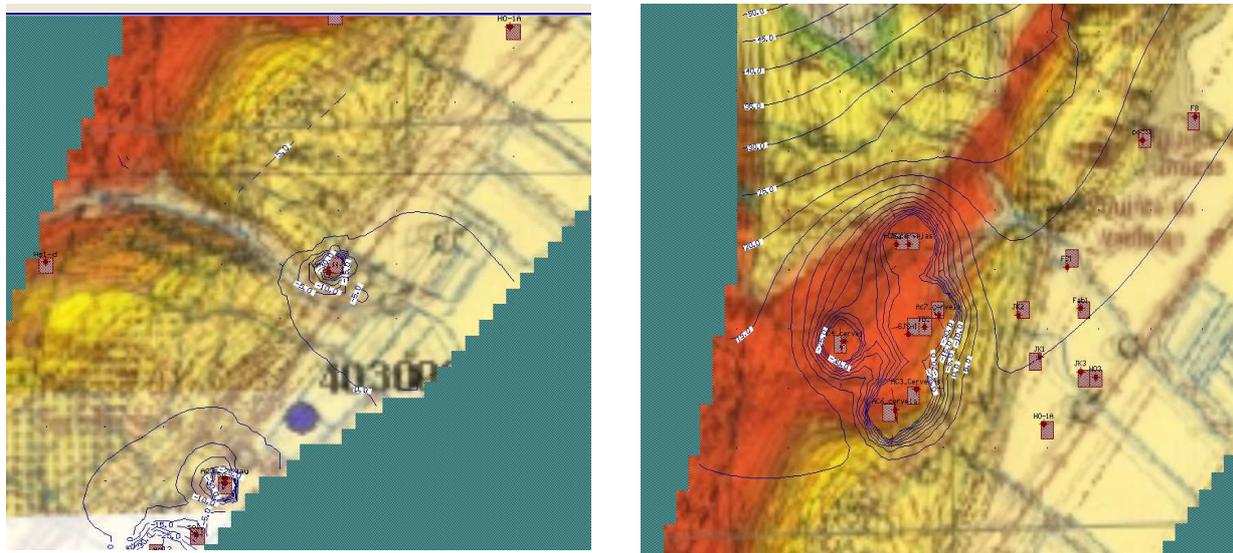


Figura 14 – Resultados da corrida em estado transitório do passo temporal de 1993 a 2007 (nível piezométrico). A imagem à esquerda corresponde ao quadrado A da Fig. 13 e a imagem à direita ao quadrado B

Em anexo encontra-se um gráfico do comportamento temporal do nível piezométrico em vários pontos da região (ANEXO VII).

#### b) Subsidiência

Em relação aos resultados da subsidiência foi necessário proceder à extracção dos valores dos ficheiros de saída e conseqüente projecção em informação SIG. A Figura 15 representa uma imagem geral de alguns valores de subsidiência modelados com o pacote SUB para o caso de estudo em Vialonga.

A Figura 16 representa a visualização de alguns pontos de subsidiência modelados nas zonas mais afectadas pelo problema e sua comparação com os valores de PSInSAR, utilizando a mesma escala de cores para a velocidade anual de subsidiência (mm/ano). Na Figura 16 a imagem à esquerda corresponde ao quadrado A da Figura 15 e a imagem à direita corresponde ao quadrado B da Figura 15.

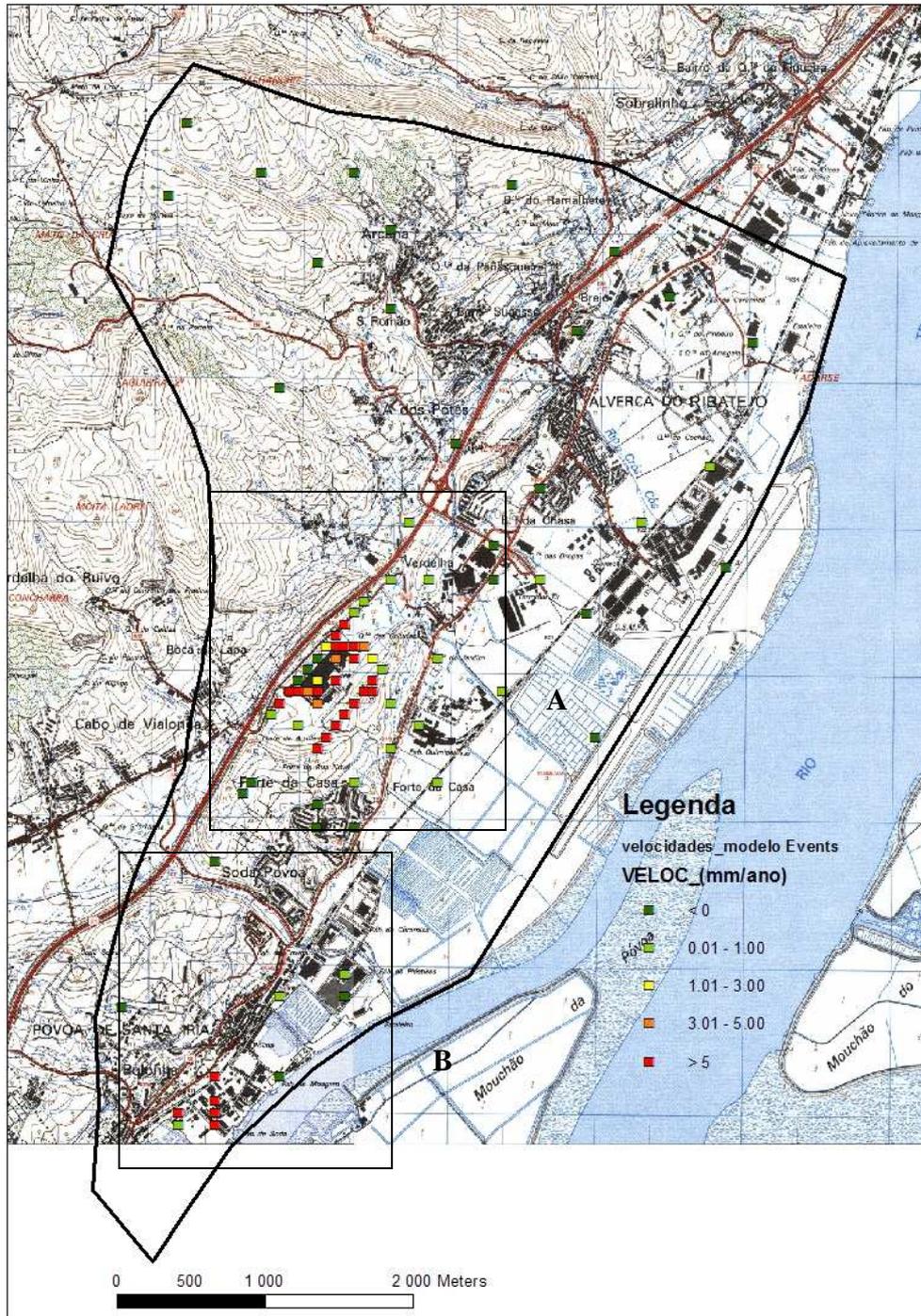


Figura 15 – Resultados espaciais da subsidência modelada com o pacote SUB no caso em estudo de Vialonga (velocidades médias anuais em mm / ano)

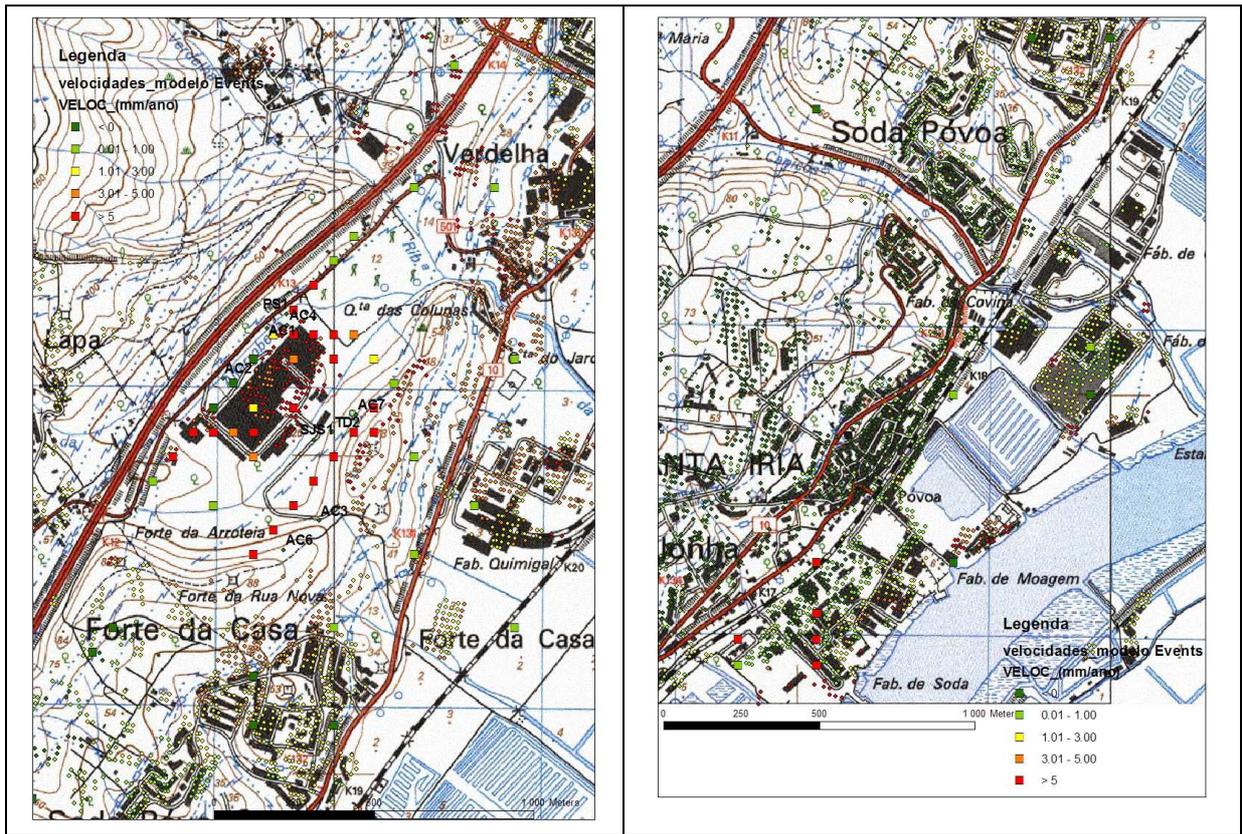


Figura 16 – Resultados espaciais da subsidência modelada com o pacote SUB em zonas específicas do caso em estudo e comparação com os valores de PSInSAR (velocidades médias anuais em mm / ano)

Para uma melhor visualização do comportamento da subsidência de terrenos ao longo do tempo desenvolveu-se o gráfico apresentado na Figura 17, que representa a subsidência do terreno em metros ao longo do tempo num ponto específico (Célula 63, 32).

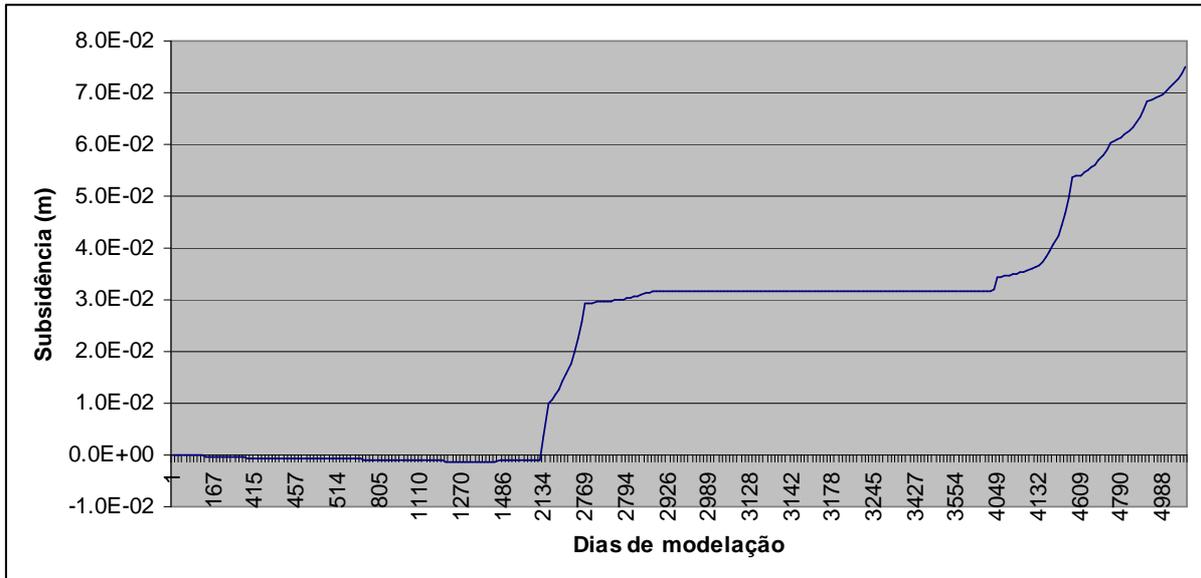


Figura 17 – Subsidência do terreno na célula localizada na linha 63 e coluna 32, durante o período temporal de 1993 a 2007

### **3.9 Corrida do modelo em regime transitório para quatro cenários futuros (2004-2015)**

#### *3.9.1 Resultados de subsidência na modelação de cenários futuros*

Como referido anteriormente, existe uma necessidade de traçar respostas para o problema de subsidência na região. Tendo em conta as soluções apresentadas na secção dedicada à resposta da metodologia DPSIR foi traçado o objectivo de modelar quatro cenários futuros (até 2015):

1. Os furos não param e mantém-se os mesmos valores de caudal de extracção;
2. Os furos diminuem a sua extracção para metade e há um isolamento dos ralos nas zonas mais afectadas pela subsidência;
3. Todos os furos param de extrair;
4. Os furos param de extrair e existe uma injeccção por recarga artificial na zona mais afectada pelo problema (Central de Cervejas). Este cenário foi subdividido em três:
  - a) Injecção com um valor total de 400 m<sup>3</sup>/dia de água (100 m<sup>3</sup>/dia por furo em funcionamento);
  - b) Injecção com um valor total de 800 m<sup>3</sup>/dia de água (200 m<sup>3</sup>/dia por furo em funcionamento);
  - c) Injecção com o mesmo valor de caudal que estava a ser extraído.

As seguintes seis imagens apresentadas representam os resultados da velocidade média anual de subsidência para a região em cada um dos cenários descritos anteriormente (Figura 18, Figura 19, Figura 20, Figura 21, Figura 22 e Figura 23).

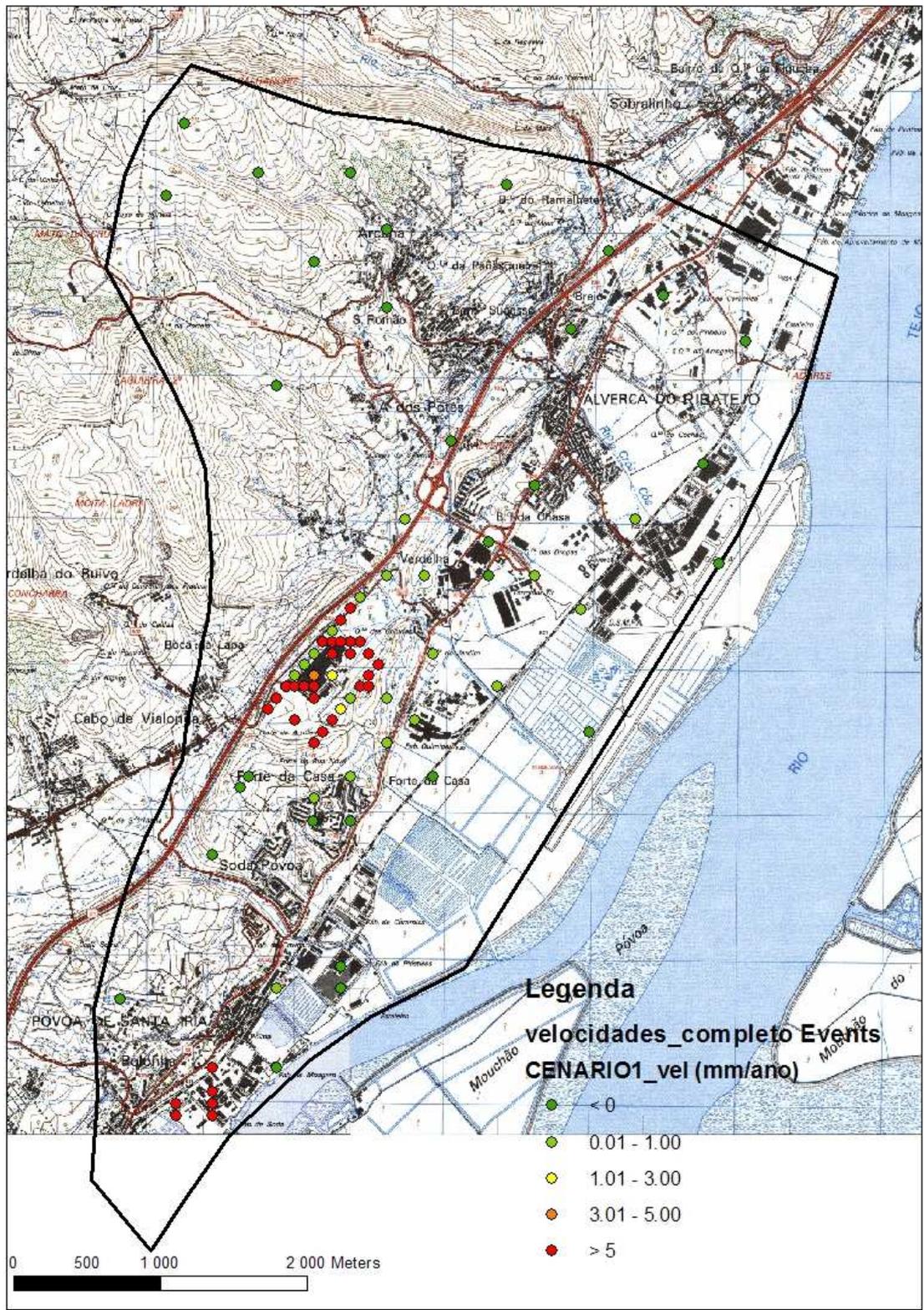


Figura 18 – Velocidades de subsidência modeladas para o Cenário 1 na zona de Vialonga

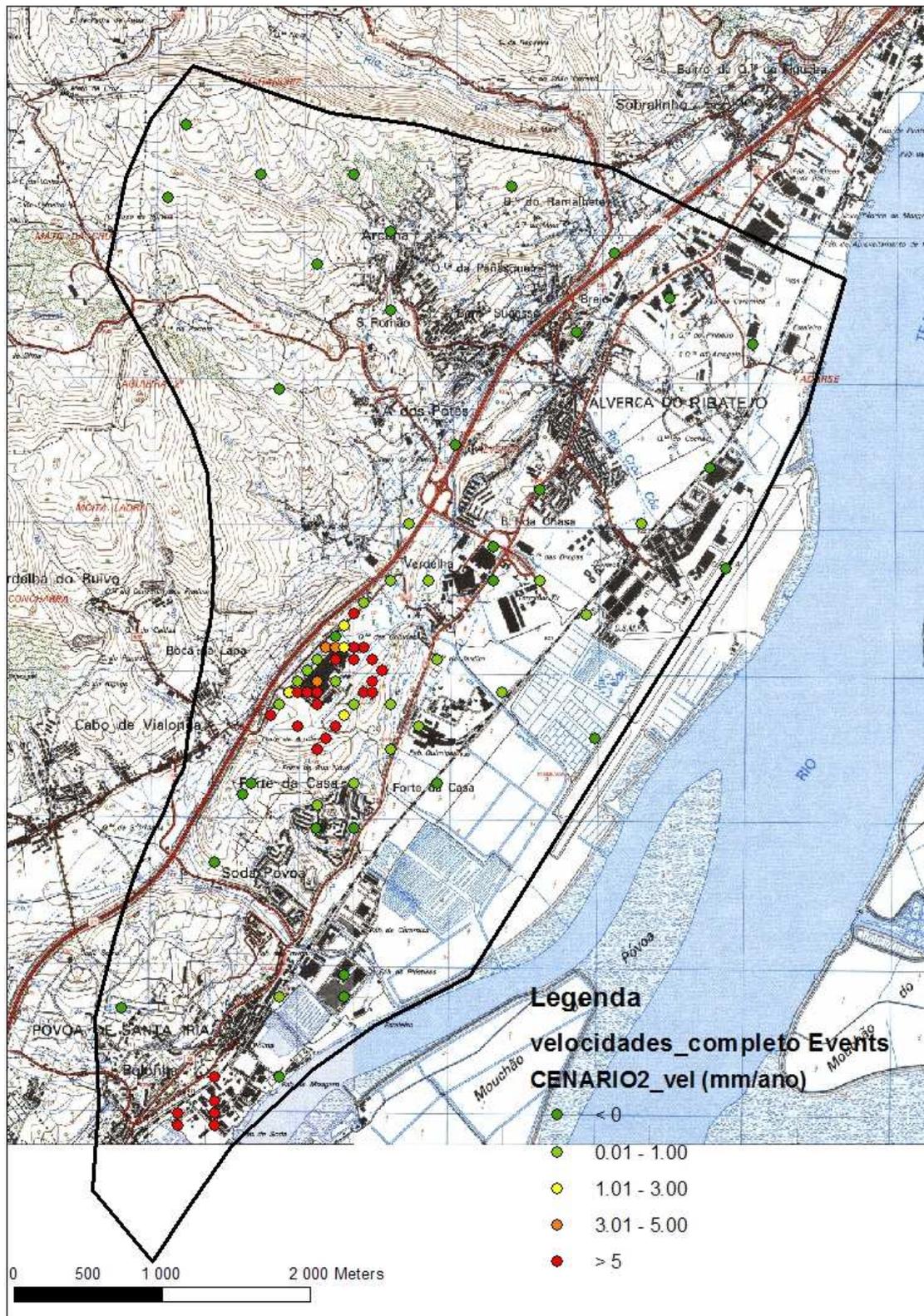


Figura 19 – Velocidades de subsidência modeladas para o Cenário 2 na zona de Vialonga

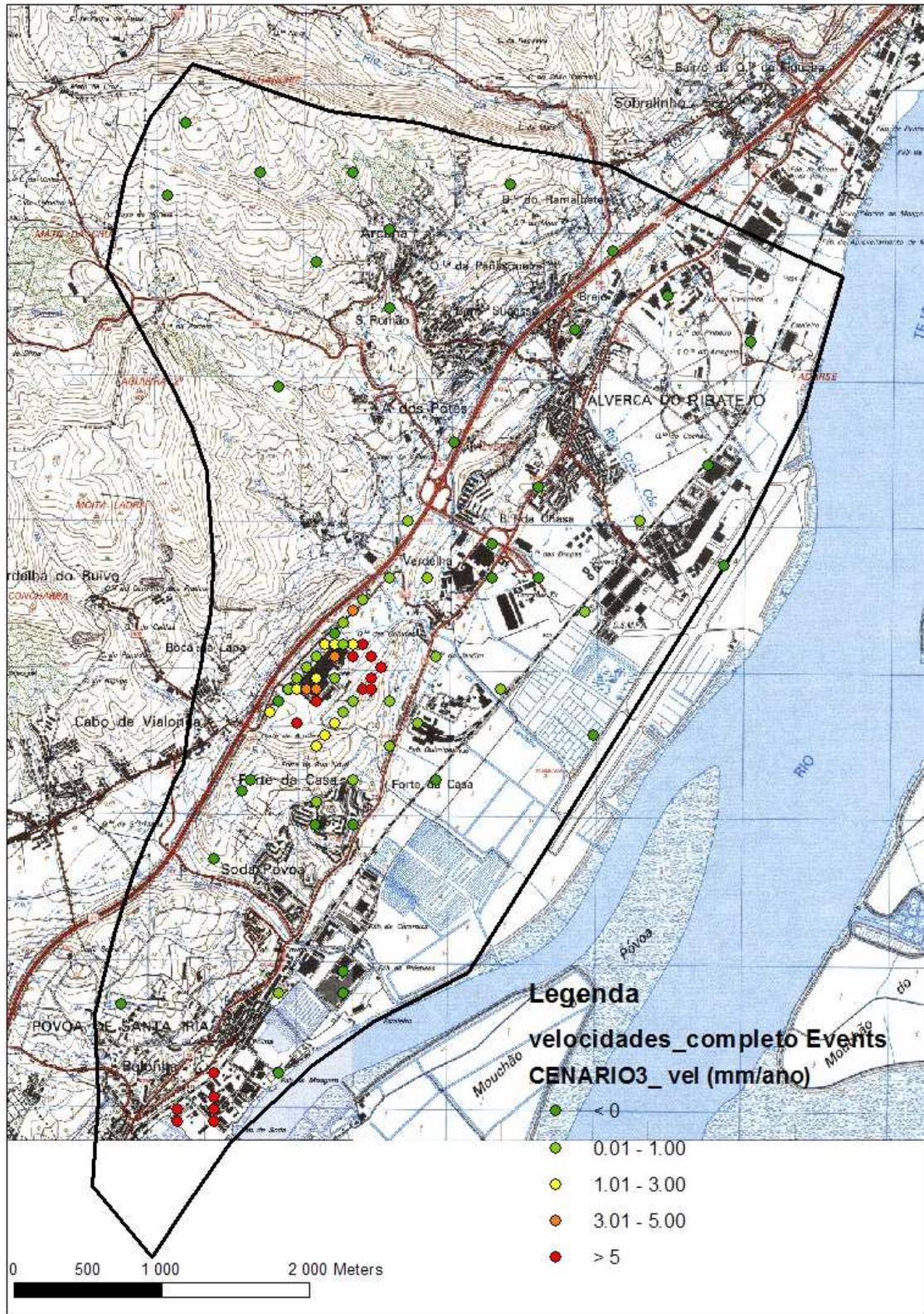


Figura 20 – Velocidades de subsidência modeladas para o Cenário 3 na zona de Vialonga

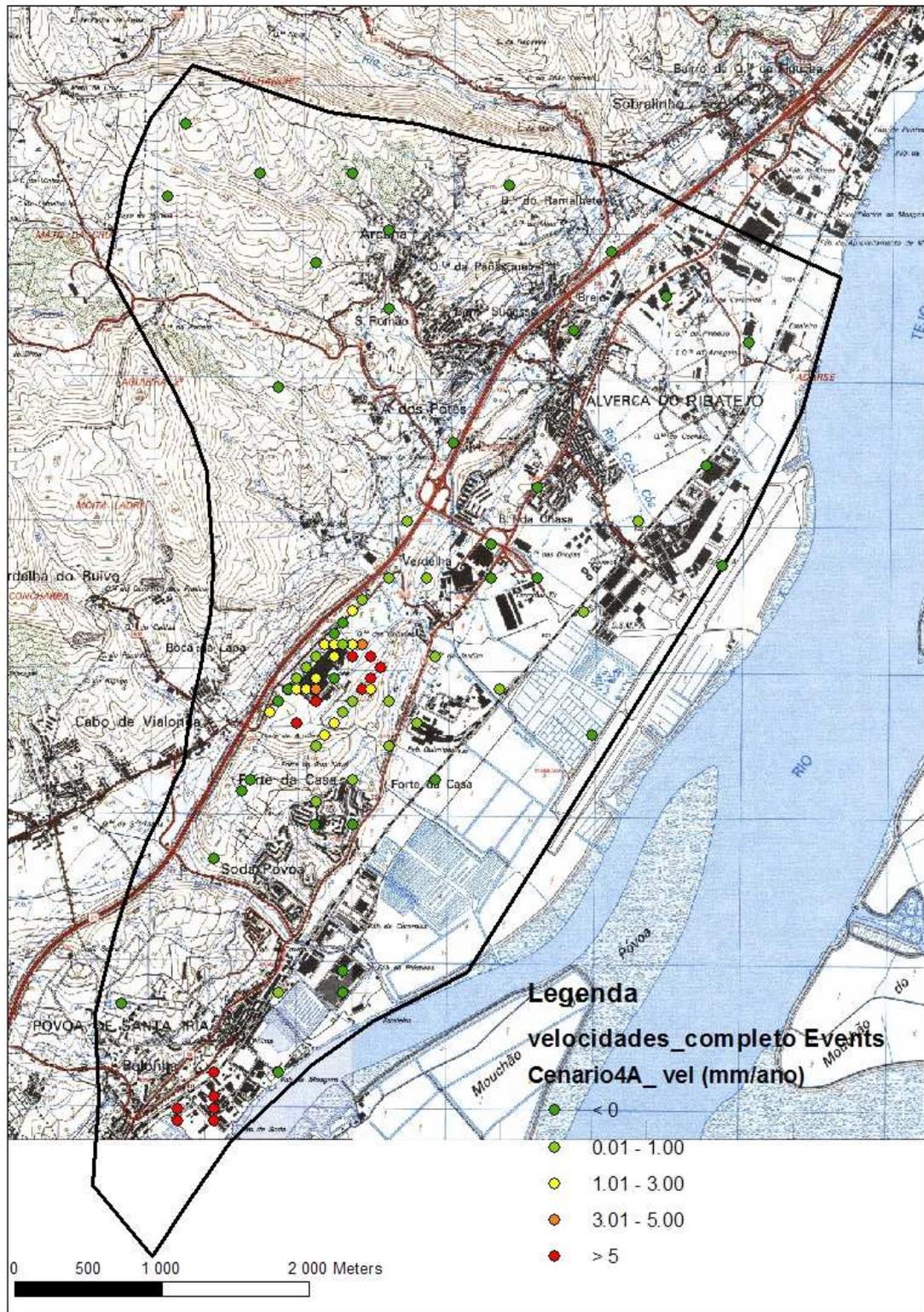


Figura 21 – Velocidades de subsidência modeladas para o Cenário 4 A na zona de Vialonga

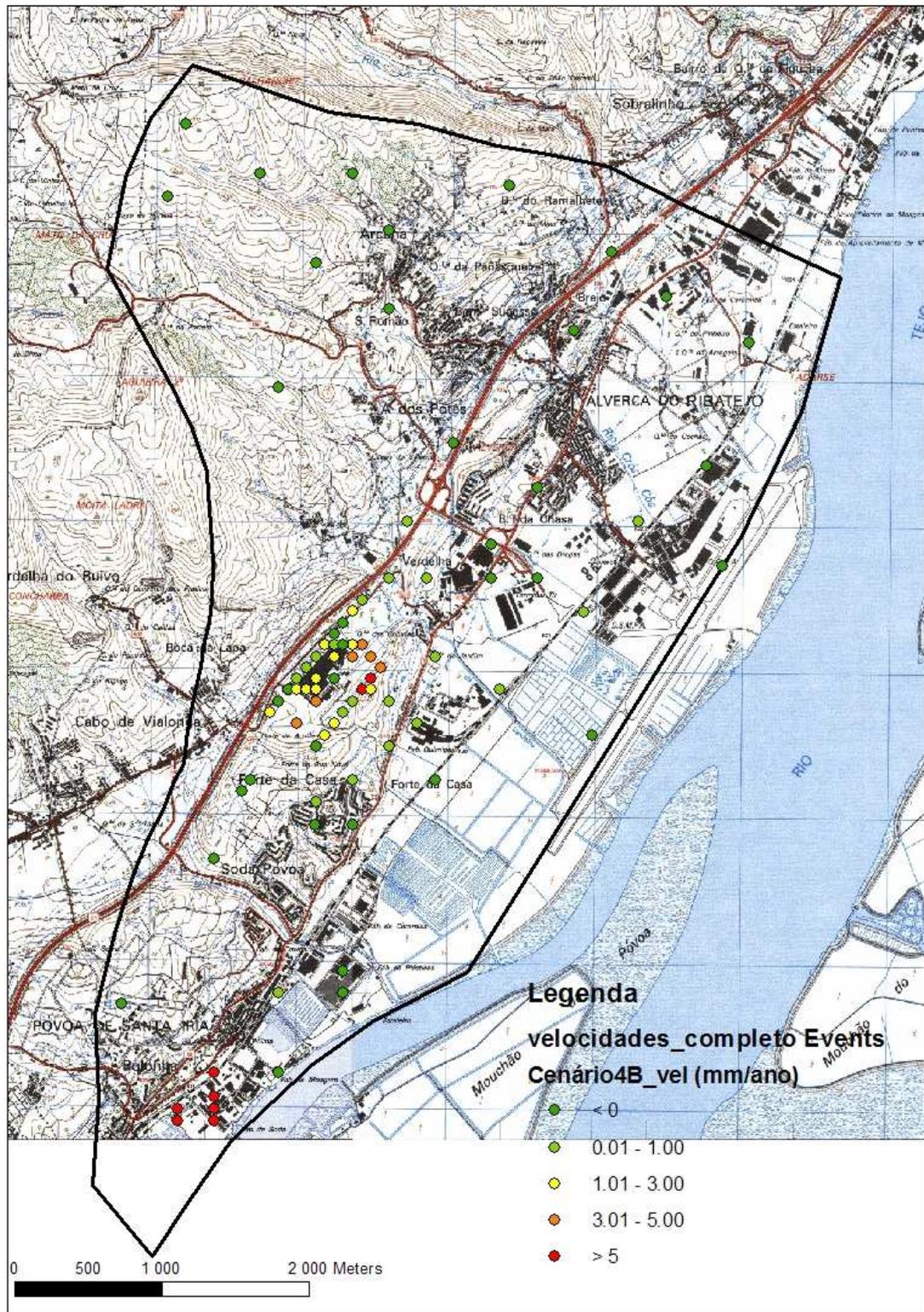


Figura 22 – Velocidades de subsidência modeladas para o Cenário 4 B na zona de Vialonga

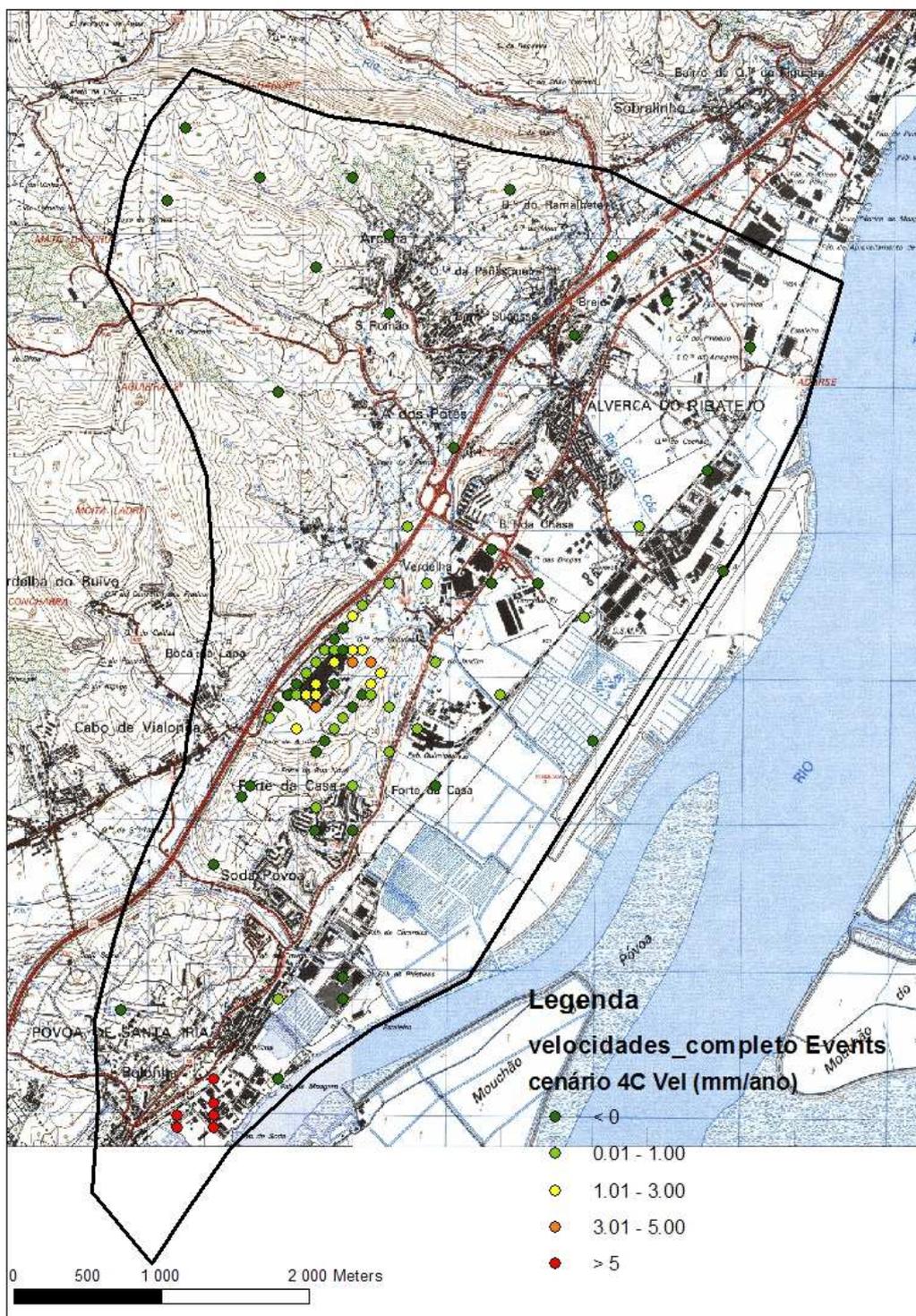


Figura 23 – Velocidades de subsidência modeladas para o Cenário 4 C na zona de Vialonga

A Figura 24 representa a comparação de velocidades médias anuais de subsidência entre o cenário 4C (valores em círculos) e as velocidades registadas em modelo no período temporal entre 1993 e 2007 (valores em quadrados) na zona onde se aplicou a solução de injeção de recarga artificial.

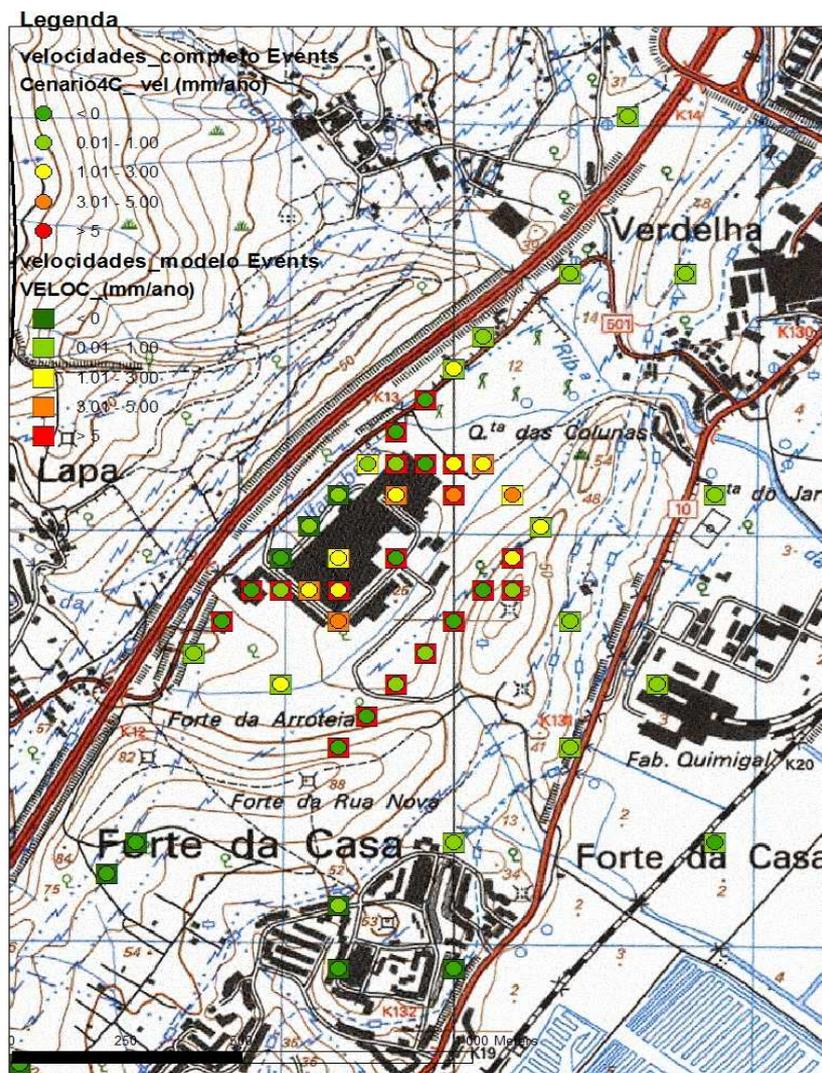


Figura 24 – Comparação de velocidades médias anuais de subsidência entre o cenário 4C (2007 a 2015) e o período temporal de 1993 a 2007

### 3.9.2 Análise comparativa sobre os cenários considerados

De forma a se estabelecer uma melhor escolha relativamente aos cenários considerados aplicou-se uma análise comparativa numa das células do modelo. A célula considerada apresenta um valor de subsidência modelado de 0,056 m por ano e localiza-se na zona da Central de Cervejas, na linha 66 e coluna 36.

Traçando gráficos temporais de 2007 a 2015 no ponto escolhido obtêm-se os seguintes dois gráficos apresentados abaixo. A Figura 25 representa um gráfico com os seis cenários considerados e a Figura 26 representa um gráfico para os cenários 3, 4A, 4B e 4C.

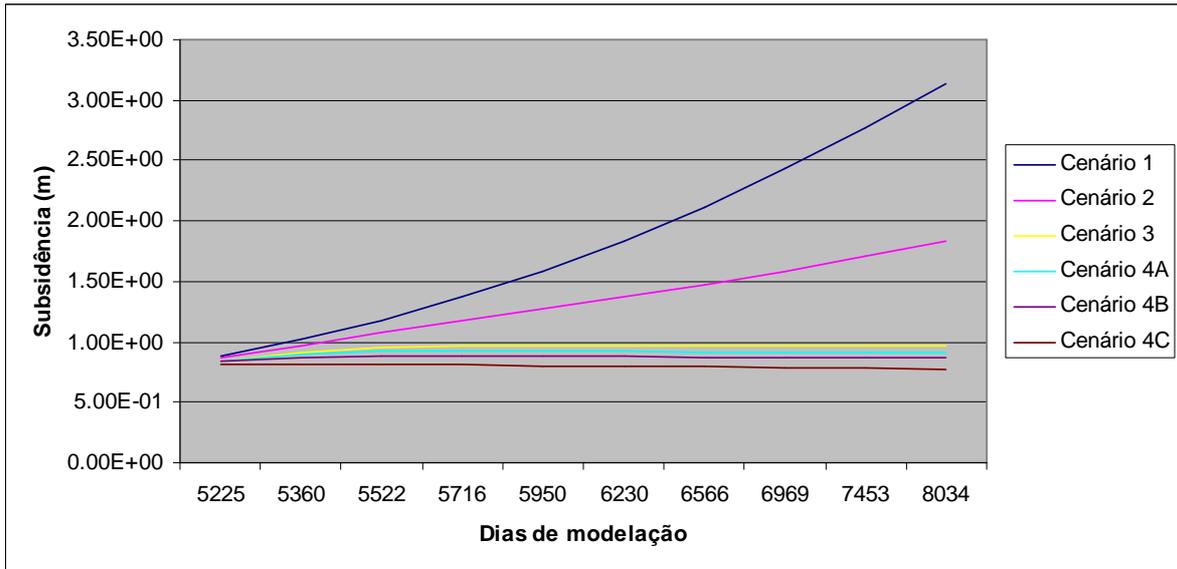


Figura 25 – Gráfico do comportamento temporal para os vários cenários futuros (ponto na linha 66 e coluna 36)

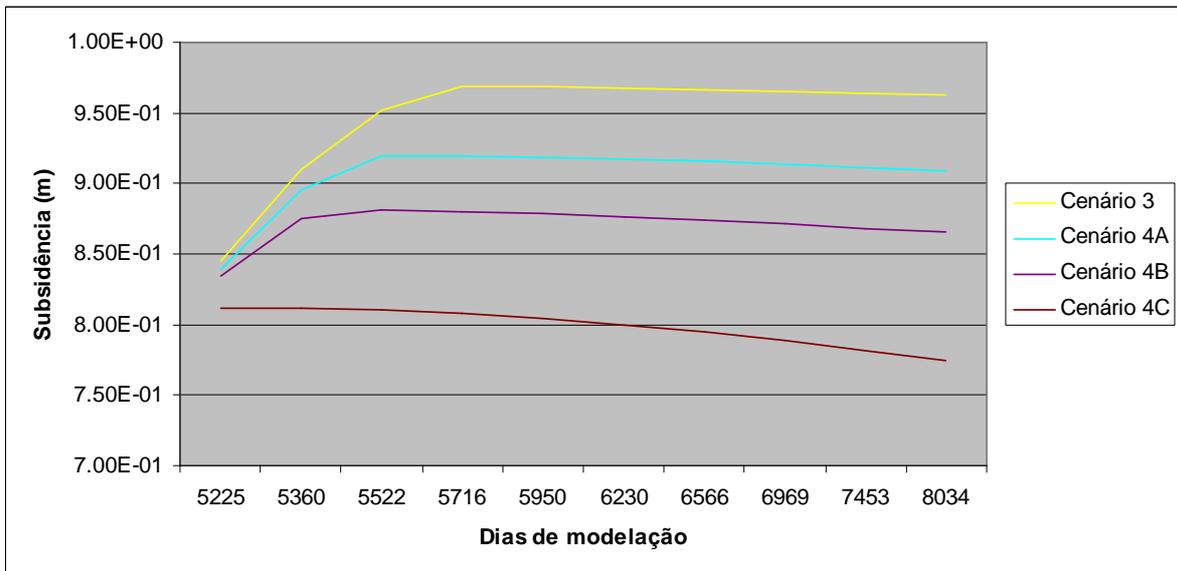


Figura 26 – Gráfico do comportamento temporal para os cenários 3, 4A, 4B e 4C (ponto na linha 66 e coluna 36)

O Quadro 10 representa os valores das velocidades médias anuais de subsidência no ponto considerado.

Quadro 10 – Velocidades médias anuais de subsidência (célula da linha 66 e coluna 36)

	<b>Velocidade média de subsidência (mm/ano)</b>
De 1993 a 2007	54,31
Cenário 1	297,56
Cenário 2	133,68
Cenário 3	25,29
Cenário 4 A	18,60
Cenário 4 B	13,10
Cenário 4 C	1,81

É possível analisar que, quer para o cenário 1 (igual extracção) quer para o cenário 2 (diminuição da extracção e conseqüente isolamento de ralos), há um aumento da velocidade média de subsidência na região e que a total paragem da extracção (cenário 3) provocaria uma estabilidade de subsidência na região e que a concretização dos subcenários 4 faria com que o terreno tivesse comportamento de reabilitação, i.e. oposto à subsidência.

#### **4 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

Diversas conclusões podem ser retiradas do estudo efectuado, podendo vir a ser utilizadas pelas autoridades competentes ou por responsáveis ligados às indústrias da região afectada.

O estudo desenvolvido pela componente de águas subterrâneas do projecto SUBSIn permitiu uma boa caracterização, análise (com auxílio da metodologia DPSIR) e modelação dos casos em estudo na zona da Grande Lisboa.

Em relação à modelação do fluxo e subsidência do caso de estudo em Vialonga verifica-se que:

- Os valores de condutividade hidráulica horizontal diferem dos esperados. Com efeito, a unidade geológica que, pelas suas características geológicas e valores registados em 1960 (segundo relatórios de sondagem), deveria apresentar maiores valores de condutividade hidráulica é, na verdade, uma das unidades que foi modelada com mais baixo valor de condutividade hidráulica horizontal. Uma possível justificação para este resultado pode dever-se ao enorme stress provocado no material geológico, devido à exploração não sustentável de água subterrânea na região, que levou a um diferente comportamento do material presente nesta unidade;

- Os valores de subsidência modelados são aproximadamente iguais aos valores obtidos por PSInSAR. De destacar que os valores PSInSAR são valores de subsidência medidos directamente e os valores modelados são indirectos e dependem muito do grau de rigor dos dados usados no modelo;

- A subsidência abranda com a modelação da paragem total da extracção e, como tal, tem de ser a medida considerada prioritária para uma análise mais pormenorizada;

- Na modelação de cenários futuros nota-se que a injeção de água provoca uma elevação do terreno e logo será uma medida a ter em conta. No entanto, a energia e volume de água necessários à elevação do terreno seriam demasiados elevados e haveria um encargo financeiro elevado para esta solução. Assim, é de destacar que, de forma a solucionar o problema da subsidência de terrenos com a solução de injeção de água subterrânea seriam necessários estudos mais pormenorizados (e.g. estudos económicos) e com disponibilização de dados adicionais.

Como passos a seguir para o problema apresentado são de destacar os seguintes pontos:

- Continuação da monitorização:

- a) Da subsidência;
- b) Dos níveis de água.

- Melhoramento do modelo através de dados mais precisos sobre as características dos materiais geológicos, nomeadamente relativos:

- a) À condutividade hidráulica;
- b) À porosidade;
- c) Ao coeficiente de armazenamento;
- d) À inclinação das camadas podendo ter em conta o carácter tensorial (das tensões e deformações).

- Melhoramento do modelo com a correcta informação dos furos de captação, nomeadamente:
  - a) Localização exacta;
  - b) Localização dos ralos;
  - c) Caudal de extracção;
  - d) Nível piezométrico actual e seu histórico que possam ser usados como valores de calibração.

Para os decisores ligados à zona em Vialonga considera-se ser de recomendar:

- A contínua monitorização das estruturas dos edifícios de forma a analisar as deformações;
- O eventual desenvolvimento de um reforço estrutural onde for necessário;
- Para as fábricas e populações na zona aluvionar monitorizar os valores de cota de terreno, anualmente, comparando-os com os valores de máxima cheia do Tejo na região;
- O desenvolvimento de um estudo sobre o risco da zona ser afectada por cheias devido a precipitação excessiva. Este estudo deverá ter em conta a análise do actual sistema de drenagem e a sua compatibilidade com novas cotas de terreno ao longo dos anos.

Por fim, recomenda-se às indústrias da região que, para mitigarem eventuais problemas estruturais ao longo dos anos e a necessidade de contínuas obras (nas estruturas e no sistema de drenagem), desenvolvam um estudo mais detalhado de forma a verificar a necessidade da diminuição da extracção de água subterrânea recorrendo a fontes alternativas.

Crê-se que o estudo efectuado pela componente das águas subterrâneas do projecto SUBSIn, um estudo de cariz metodológico, irá permitir auxiliar outros estudos ou projectos que envolvam a modelação de subsidência de terrenos devido à exploração não sustentável de água subterrânea.

Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Janeiro de 2010

**VISTOS**



J.P. Cárcomo Lobo Ferreira  
Chefe do Núcleo de Águas Subterrâneas

**AUTORIAS**



Luís Guilherme Sousa de Oliveira  
Mestre em Engenharia do Ambiente  
Bolseiro FCT do projecto



J.P. Cárcomo Lobo Ferreira  
Doutor em Eng. Civil  
Investigador – Coordenador do projecto no  
Núcleo de Águas Subterrâneas



Rafaela de Saldanha Matos  
Directora do Departamento de Hidráulica e  
Ambiente



Sandra Isabel Neves Heleno Silva  
Doutora em Engenharia Física Tecnológica  
Investigadora – Coordenadora do projecto no  
Instituto Superior Técnico



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cabral, Jaime J. S. P., Farias, Veronilton P., Sobral, Maria do C., de Paiva, Anderson L. R. e Santos, Renata B. (2008) - "Groundwater Management in Recife", *Water International*, 33:1, pp. 86 — 99.
- Canter, L. W. e R.C. Knox (1985) – "Ground Water Pollution Control". Lewis Publishers Inc., USA.  
Disponível na WWW: [http://books.google.pt/books?id=tgYEyDN03nIC&printsec=frontcover&source=gbs\\_navlinks\\_s#v=onepage&q=&f=false](http://books.google.pt/books?id=tgYEyDN03nIC&printsec=frontcover&source=gbs_navlinks_s#v=onepage&q=&f=false).
- Carvalho, J., Rabeh, T., Cabral, J., Carrilho, F. e Miranda, M. (2008) – "Geophysical Characterization of the Ota-Vila Franca de Xira-Lisbon-Sesimbra Fault Zone, Portugal", *Geophysical Journal International*, pp. 567–584.
- Freeze, R. A. e Cherry, J. A. (1979) – "Ground Water". Prentice-Hall Inc., USA, New Jersey.
- Heleno, Sandra, Afonso Loureiro, João Fonseca, João Matos, João Carvalho, Geraint Cooksley, Ana Paula Falcão e Alessandro Ferretti (2008) - "Detection Of Ground Motion In The Lisbon Region With Persistent Scatterer Interferometry (Psi)", 13th FIG Symposium on Deformation Measurement and Analysis e 4th IAG Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering, Lisboa, 12-15 Maio.
- Jensen, T.B., Harpole, K.J., Østhus, A. e Phillips Petroleum Company (2000) – "EOR Screening for Ekofisk". SPE European Petroleum Conference, 24-25 October 2000, Paris, França.
- Lobo Ferreira, J.P.C., Oliveira, M.M. e Diamantino, C. (2007) – "GABARDINE Project: Portuguese Test Site Contribution to D24". Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Mortensen, L.F. (1997). "The Driving Force-State-Response Framework Used by Cds". In Moldan, B.; Billharz, S. Sustainability indicators: Report from the project on indicators for sustainable development. Consultado em Abril de 2007. Disponível na WWW: <http://www.icsu-scope.org/downloadpubs/scope58/box1d.html>.
- Oliveira, L. G. S. (2007) - "Soluções Para Uma Gestão Adequada De Bacias Hidrográficas E De Sistemas Aquíferos, Em Cenários De Escassez Hídrica Extrema", Dissertação apresentada ao Instituto Superior Técnico para a obtenção do grau Mestre em Engenharia do Ambiente. Lisboa, Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa.
- Oliveira L. G. S., Lobo Ferreira, J.P.C e Heleno, S. (2009) – "Subsin - Utilização Do INSAr Na Detecção E Caracterização De Subsidência E Deslizamentos Do Solo Na Região De Lisboa: Componente Águas Subterrâneas - Primeiro relatório de progresso referente às bases teóricas e caracterização dos casos em estudo". Relatório 236/2009- NAS. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil. 82 pp.

- Plano de Bacia Hidrográfica das Ribeiras do Algarve (2000) – “1ª Fase - Análise e Diagnóstico da Situação de Referência”. Lisboa, Ministério do Ambiente do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional. Disponível na WWW: <http://www.ccdr-alg.pt/ccr/index.php?module=ContentExpress&func=display&ceid=287>.
- Terceiro, A.P. (2008). “Análise Da Governância No Quadro Da Gestão Da Qualidade Da Água Da Bacia Hidrográfica Do Guadiana: Aplicação Ao Primeiro Enchimento Da Albufeira De Alqueva (2002-2007)”. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em hidráulica e recursos hídricos. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal.
- Valadão, G., J. Matos, C. Oliveira, J. Fonseca, M. Santos, F. Novali (2005) - “Subsidências Para a Região de Lisboa por PSInSAR: Análise Preliminar de Resultados”, Proc. Conf. Nacional de Cartografia e Geodesia, Lisboa, Portugal, Vol. 1, pp. 378 – 383.

### Sites consultados

1. <http://www.jimcanning.com> – Empresa de consultoria em Engenharia Civil “Jim Canning & Partners Ltd.”
2. <http://www.eea.europa.eu/> - Agência Europeia do Ambiente
3. [www.gabardine-fp6.org/](http://www.gabardine-fp6.org/) - Projecto internacional GABARDINE do 6º Programa Quadro
4. <http://www.iambiente.pt/atlas/est/index.jsp> - Atlas do Ambiente (Agência Portuguesa do Ambiente);
5. <http://snirh.inag.pt> – Website do Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos do Instituto Nacional de Água

## **ANEXO I – PROGRAMA DA REUNIÃO TÉCNICA COM O PROFESSOR JAIME CABRAL (UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO, BRASIL) EM PORTUGAL**

Durante a estadia do Professor Jaime Cabral da Universidade Federal de Pernambuco, Brasil, no Núcleo de Águas Subterrâneas do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, semana de 2 e 6 de Fevereiro de 2009, desenvolveu-se uma reunião técnica com vários investigadores. Esta teve como objectivo a consulta técnica do Professor para o projecto SUBSIn, utilizando o forte conhecimento técnico do Professor Jaime Cabral na temática da subsidência de terrenos e hidrogeologia.

Os temas abordados durante a reunião técnica foram os seguintes (ordenados por ordem temporal):

1. Apresentação do projecto SUBSIN ao Professor Jaime Cabral;
2. Apresentação do caso estudo de Vialonga e trabalho já desenvolvido;
3. Apresentação do caso estudo da zona das Laranjeiras (Lisboa);
4. Análise sobre a melhor abordagem a seguir para o desenvolvimento do trabalho. Este ponto subdivide-se em:
  - a. Análise sobre os modelos numéricos mais adequados a utilizar para o estudo de subsidência devido a sobreexploração de água subterrânea;
  - b. Exploração do modelo numérico de subsidência utilizado para o caso estudo de Vialonga;
  - c. Estudo sobre as possíveis soluções para o problema de subsidência no caso estudo de Vialonga;
  - d. Análise particularizada sobre os factores necessários à aplicação da recarga artificial de sistemas aquíferos (injecção directa) como solução para o problema da subsidência no caso estudo de Vialonga;

## **ANEXO II – RESULTADOS DA REUNIÃO TÉCNICA COM O PROFESSOR JAIME CABRAL (UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO, BRASIL) EM PORTUGAL**

Os resultados obtidos da reunião técnica com o consultor foram devidamente anotados e serviram para impulsionar o desenvolvimento do segundo relatório de progresso do projecto assim como à finalização do primeiro relatório (Oliveira *et al.*, 2009).

Os resultados obtidos foram:

1. Aumento do conhecimento sobre o fenómeno da subsidência e a sua dimensão mundial;
2. Análise e desenvolvimento dos cenários de modelação necessários à aplicação no caso de estudo em Vialonga;
3. Estudo sobre o método de calibração a aplicar para a modelação do caso em estudo de Vialonga;
4. Análise sobre as consequências que podem advir da continuação da subsidência no casos em estudo no projecto;
5. Análise sobre as medidas de mitigação (i.e. Respostas DPSIR) para o fenómeno da subsidência;
6. Análise sobre os passos a seguir para a continuação de um possível projecto/estudo que envolva a subsidência nas áreas estudadas;
7. Desenvolvimento de um workshop denominado “Contributos para o conhecimento da cooperação científica portuguesa em Águas Subterrâneas com Angola e com o Brasil” no dia 6 de Fevereiro de 2009.

Durante a estadia do Professor Jaime Cabral realizou-se, ainda, uma visita ao local do caso em estudo de Vialonga.

# ANEXO III – POSTER DO WORKSHOP “CONTRIBUTOS PARA O CONHECIMENTO DA COOPERAÇÃO CIENTÍFICA PORTUGUESA EM ÁGUAS SUBTERRÂNEAS COM ANGOLA E COM BRASIL



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL



INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO  
Universidade Técnica de Lisboa



UFPE  
Universidade Federal  
de Pernambuco

## WORKSHOP

Contributos para o conhecimento da cooperação científica portuguesa  
em Águas Subterrâneas com Angola e com o Brasil

Sexta-feira, 6 de Fevereiro de 2009, 15:00 às 17:30h

LNEC, Pequeno Auditório, Avenida do Brasil, 101, Lisboa

## PROGRAMA

*15:00 – Introdução ao Workshop. Apresentação dos projectos de cooperação Portugal - Brasil - Angola - Cabo Verde e Guiné Bissau CIAS (Cooperação Internacional em Águas Subterrâneas) e CISA (Cooperação Internacional no Semi-Árido) e o caso de estudo da cooperação portuguesa em águas subterrâneas com Angola na Bacia do rio Cunene - Doutor J.P. Lobo Ferreira, Chefe do Núcleo de Águas Subterrâneas do LNEC.*

*15:30 – Realidade das Águas Subterrâneas em Angola: particularização ao estudo da vulnerabilidade das águas subterrâneas do aquífero Quelo-Luanda - Prof. Adriano Adão, Professor Assistente do Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade Agostinho Neto, Luanda, Angola.*

*16:00 – Introdução ao Projecto SUBSIn - Utilização do InSAR na detecção e caracterização de subsidência e deslizamentos do solo na região de Lisboa, e apresentação da componente Águas Subterrâneas - Prof.ª Sandra Heleno, Núcleo de Engenharia Sísmica e Sismologia, ICIST, Instituto Superior Técnico (IST/UTL) e Mestre Luís Oliveira, Bolseiro no Núcleo de Águas Subterrâneas do LNEC.*

*16:30 – A problemática da sobreexploração das águas subterrâneas: Considerações sobre o risco de subsidência na planície fluvial marinha da cidade do Recife (Brasil) – Prof. Jaime Cabral, Professor Associado do Departamento de Engenharia Civil e Pesquisador do Grupo de Recursos Hídricos da Universidade Federal de Pernambuco.*

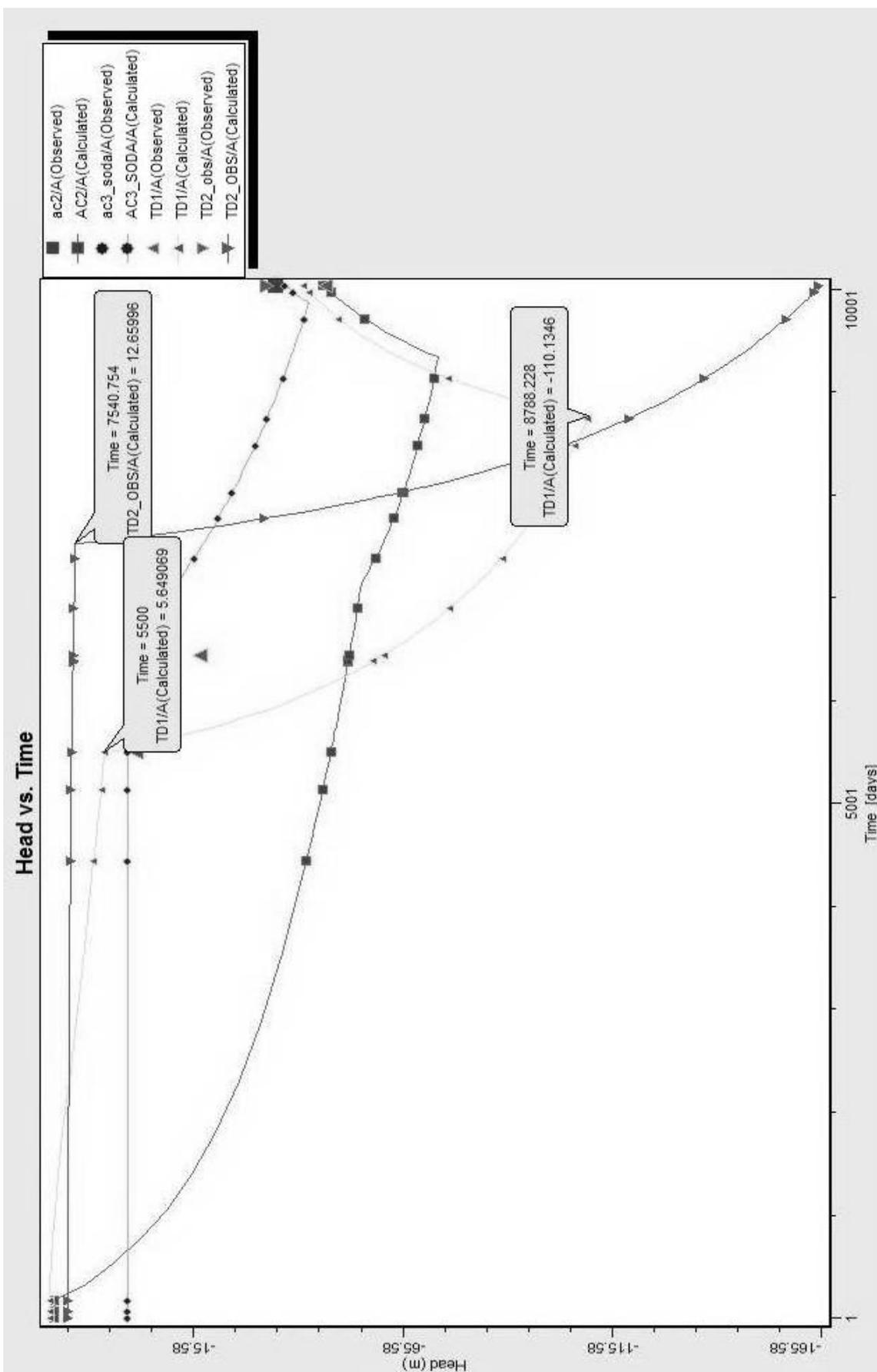
**17:00 - Debate**



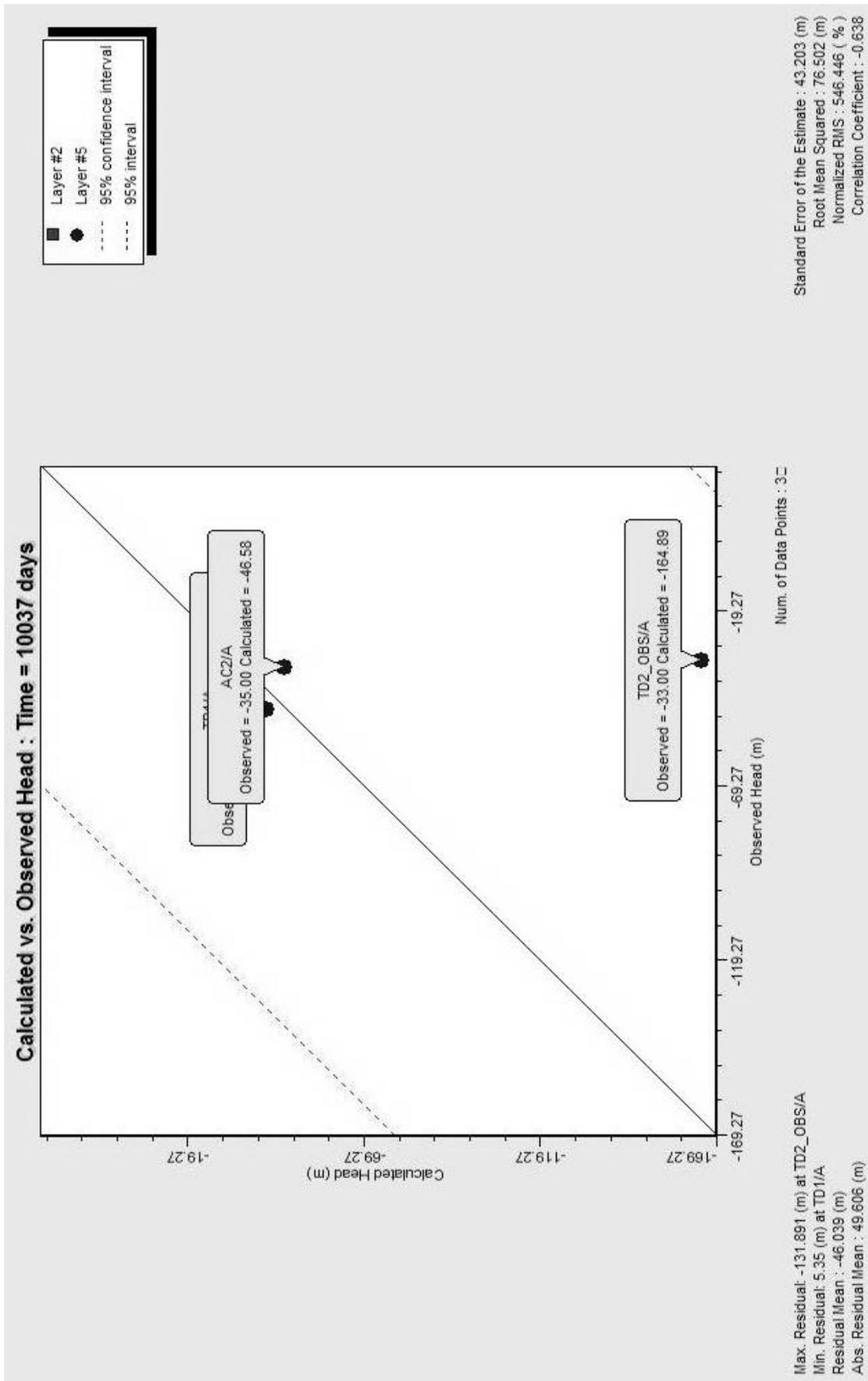
Apoios e patrocinadores:



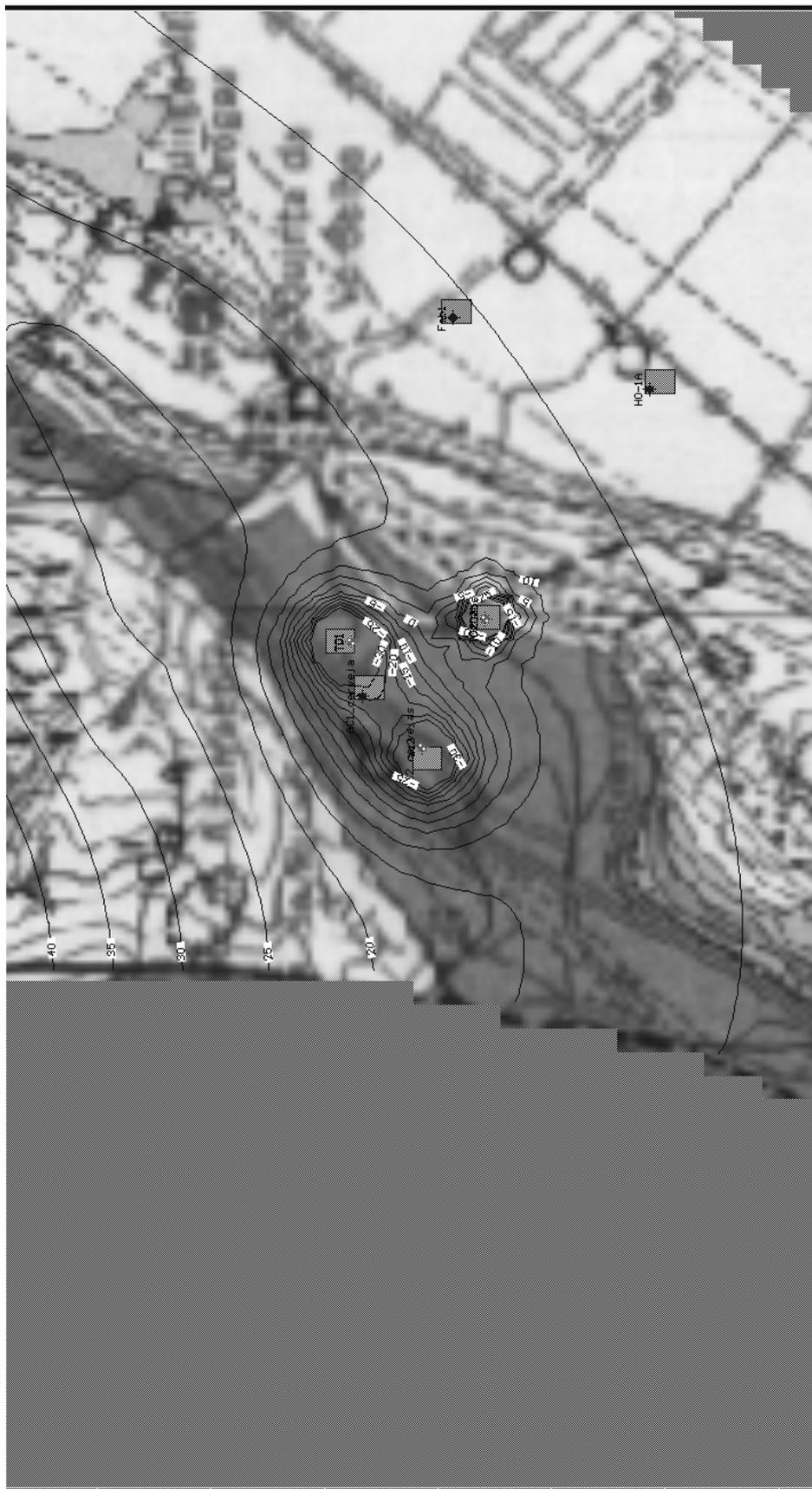
ANEXO IV – VARIÇÃO DO NÍVEL PIEZOMÉTRICO (EM METROS) AO LONGO DO TEMPO EM VÁRIOS PONTOS DA REGIÃO – CORRIDA DO MODELO DE 1966 A 1993



**ANEXO V – COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES PIEZOMÉTRICOS OBSERVADOS E OS VALORES CALCULADOS EM TRÊS FUROS – VALORES DE 25-06-1993**



**ANEXO VI – CURVAS DE NÍVEL PIEZOMÉTRICO NO DIA 24 DE JANEIRO DE 1990, NA QUINTA CAMADA DO MODELO**



Localização da imagem corresponde à letra B da Figura 10

## ANEXO VII – VARIACÃO DO NÍVEL PIEZOMÉTRICO (EM METROS) AO LONGO DO TEMPO EM VÁRIOS PONTOS DA REGIÃO – CORRIDA DE 1993 A 2006

