

# ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS EM PORTUGAL CENÁRIOS, IMPACTOS E MEDIDAS DE ADAPTAÇÃO

PROJECTO SIAM III

F. D. Santos e P. Miranda (editores)

gradiva

## Índice Geral

AUTORES .....	9
AGRADECIMENTOS .....	13
PREFÁCIOS .....	15
CAPÍTULOS	
1 – PROBLEMÁTICA DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS NO INÍCIO DO SÉCULO XXI .....	17
2 – O CLIMA DE PORTUGAL NOS SÉCULOS XX E XXI .....	45
3 – RECURSOS HÍDRICOS .....	115
4 – ZONAS COSTEIRAS .....	169
5 – AGRICULTURA .....	209
6 – SAÚDE HUMANA E IMPLICAÇÕES PARA O TURISMO .....	233
7 – ENERGIA .....	271
8 – FLORESTAS E BIODIVERSIDADE .....	301
9 – PESCAS .....	345
10 – ESTUDO DE CASO DA REGIÃO DO SADO .....	385
11 – CENÁRIOS SOCIOECONÓMICOS .....	481
12 – DISSEMINAÇÃO E INTERACÇÃO COM A SOCIEDADE – <i>OUTREACH</i> .....	493

### 3. Recursos Hídricos

**Autores:** Luís Veiga da Cunha (Coordenador), Luís Ribeiro, Rodrigo Proença de Oliveira, João Nascimento

**Contribuições:** José Paulo Monteiro, Luís Nunes, Amélia Carvalho Dill

#### 3.1 INTRODUÇÃO

No volume que foi publicado em resultado da fase inicial do Projecto SIAM (Santos *et al.*, 2002) apresentou-se, no Capítulo 5, a primeira análise relativa a Portugal Continental dos impactos das alterações climáticas sobre os recursos hídricos (Cunha *et al.*, 2002a). Esta análise, publicada em língua inglesa, centrou-se sobre os aspectos ligados à quantidade dos recursos hídricos superficiais. No presente capítulo, em que se apresentam os resultados da segunda fase do Projecto SIAM, expande-se e actualiza-se o trabalho apresentado na primeira fase (que agora é também apresentado, pela primeira vez, em língua portuguesa) e estende-se a análise ao estudo dos impactos sobre os recursos hídricos subterrâneos, analisando-se não só os aspectos relacionados com a quantidade destes recursos, mas também, em certos casos, com a sua qualidade. O desenvolvimento desta segunda fase do Projecto SIAM no âmbito dos recursos hídricos constitui, tal como já tinha acontecido com a primeira fase, um estudo pioneiro.

Os estudos até agora realizados correspondem, pois, à análise dos impactos das alterações climáticas sobre a oferta de águas superficiais e subterrâneas, ficando por concretizar o estudo completo dos impactos das alterações climáticas sobre a qualidade dos recursos hídricos e também o estudo dos impactos sobre a procura dos recursos hídricos.

É unanimemente reconhecido que os recursos hídricos constituem um domínio fundamental para a avaliação dos impactos das alterações climáticas nas actividades humanas. Esta relevância resulta da circunstância de as alterações climáticas terem impactos directos no regime de ocorrência e disponibilidade dos recursos hídricos, e também do facto de este regime condicionar, por sua vez e de forma importante, uma multiplicidade de sectores da actividade económica e social. A água é utilizada não só para satisfazer diversas actividades humanas, como, por exemplo, as domésticas, industriais, agrícolas, energéticas, piscícolas, recreativas, de navegação e de depuração de efluentes, mas também para assegurar uma boa qualidade ambiental e uma boa saúde dos ecossistemas. Na realidade, a disponibilidade de água de qualidade adequada e a ocorrência dos fenómenos extremos relacionados com a água – as cheias e as secas – condicionam a localização dos aglomerados urbanos, das áreas industriais

e agrícolas, dos centros de produção de energia e das actividades comerciais.

Os recursos hídricos têm, em algumas regiões, uma distribuição bastante irregular, tanto no tempo como no espaço. Portugal Continental constitui um bom exemplo desta irregularidade, com a precipitação anual a variar na proporção de cerca de 1 para 3, entre os anos mais secos e os anos mais húmidos, e a distribuição regional da precipitação anual a variar de cerca de 1 para 10 entre as regiões mais secas e as mais húmidas do Continente português, apesar da pequena extensão do território. Esta irregularidade é a causa de muitos dos problemas que se levantam na gestão dos recursos hídricos e é responsável por muitas das situações de *stress* hídrico que são susceptíveis de ocorrer. As alterações climáticas poderão contribuir para um agravamento ou para uma atenuação destas situações, afectando tanto a oferta como a procura de água.

Os impactos das alterações climáticas sobre os recursos hídricos podem ser directos, quando resultam directamente das alterações climáticas, ou indirectos, quando resultam de modificações do sistema económico-social induzidas pelas alterações climáticas. Percebe-se pois a complexidade dos problemas em discussão que, por isso, requerem uma abordagem interdisciplinar.

Uma das primeiras descrições dos impactos das alterações climáticas sobre os recursos hídricos foi apresentada por um dos autores (Cunha, 1989) que analisa a incidência dos diversos tipos de impactos sobre:

- a quantidade total de águas superficiais e subterrâneas disponíveis e a sua distribuição no espaço e no tempo;
- a humidade do solo;
- as condições de ocorrência de cheias e de secas;
- a qualidade da água;
- os regimes de erosão, transporte e deposição de sedimentos associados ao escoamento;
- as condições ecológicas dos rios e estuários;
- a procura de água.

O estudo das alterações climáticas tem vindo a ser objecto de várias iniciativas internacionais e nacionais que procuram quantificar cenários climáticos, estudar os seus impactos e propor medidas de mitigação e de adaptação. São de des-

taçar os trabalhos do Painel Internacional sobre Alterações Climáticas (IPCC), levados a cabo por um grupo de cerca de setecentos cientistas de muitos países, na sequência de uma iniciativa das Nações Unidas. No seu terceiro relatório (IPCC, 2001), o IPCC prevê um aumento da temperatura média do ar entre 0,8 °C e 2,6 °C em 2050, e entre 1,4 °C e 5,8 °C em 2100. O estudo prevê ainda um aumento da precipitação média anual nas regiões correspondentes a latitudes mais elevadas, assim como nas regiões equatoriais, em oposição a uma diminuição da precipitação nas regiões subtropicais. A frequência e magnitude de situações de cheia irá, provavelmente, aumentar devido à concentração da precipitação no Inverno na maioria das regiões do mundo. Por outro lado, a diminuição do escoamento irá também contribuir para um aumento dos problemas ocasionados pelas secas.

O Projecto ACACIA (Parry, 2000), que correspondeu à contribuição europeia para a preparação do Terceiro Relatório de Avaliação do IPCC, indica que a temperatura média anual continuará a aumentar, em particular na costa atlântica da Europa Meridional, onde o aumento será, pelo menos, de 0,4 °C por década. Este aumento será particularmente pronunciado no Verão, esperando-se um aquecimento com uma taxa de crescimento dupla da do Norte da Europa. A precipitação média anual na Europa Meridional pode decrescer ligeiramente a uma taxa máxima de 1 % por década. Além disso, esperam-se alterações sazonais importantes. Os Invernos deverão tornar-se mais húmidos, com um aumento de precipitação de 1 % a 4 % por década, enquanto os Verões deverão tornar-se mais secos, com uma redução de cerca de 5 % por década.

Uma consequência destes cenários será um decréscimo do escoamento anual na Europa do Sul. Como a precipitação tende a concentrar-se no Inverno, a variabilidade sazonal do escoamento tenderá a aumentar. O risco de secas estivais tenderá, também, a aumentar na Europa Meridional e a possibilidade de o reduzir estará condicionada pela capacidade de armazenamento do escoamento invernal. A frequência e intensidade dos episódios de precipitação intensa tenderão a aumentar, especialmente no Inverno, aumentando o risco de inundação. É igualmente expectável que a frequência e a intensidade das vagas de calor estivais tendam a aumentar. Outras conclusões apontam para modificações negativas da qualidade da água.

As águas subterrâneas são um recurso natural imprescindível para a vida e para a integridade dos ecossistemas, representando mais de 95 % das reservas de água doce exploráveis do globo. Delas dependem, em larga medida, as actividades agrícolas e industriais, constituindo ainda as águas subterrâneas uma componente fundamental no abastecimento público. Na realidade, mais de metade da população mun-

dial depende das águas subterrâneas. Na Europa as águas subterrâneas fornecem cerca de 65 % da água destinada ao consumo humano.

As águas subterrâneas têm características que as diferenciam das águas superficiais, tais como os maiores tempos de residência e as muito menores velocidades de circulação, de que resulta uma maior interacção água-rocha. São, por esse motivo, consideradas geologicamente dependentes.

Apesar de invisíveis, as águas subterrâneas fazem parte integrante do ciclo hidrológico e, por esse facto, estão obviamente sujeitas aos impactos das alterações climáticas. Os impactos far-se-ão sentir quer directa quer indirectamente na quantidade e na qualidade desses recursos.

São praticamente inexistentes em Portugal trabalhos sobre o efeito das alterações climáticas nos recursos hídricos subterrâneos. A excepção é um trabalho desenvolvido pelo LNEC que realizou uma análise dos impactos nos recursos hídricos subterrâneos nas ilhas dos Açores (LNEC, 2003, Novo, 2003).

O Plano Nacional da Água, apesar de incluir um capítulo sobre o impacto das alterações climáticas é omissivo quanto à influência nas águas subterrâneas, limitando-se a referir muito genericamente que «as verificações observadas da temperatura e precipitação... vão reflectir-se no escoamento superficial e na recarga dos aquíferos subterrâneos» (INAG, 2001).

Consciente da importância que esta componente do ciclo hidrológico tem nas actividades socioeconómicas e na influência directa ou indirecta sobre o funcionamento de diversos ecossistemas, a primeira fase do Projecto SIAM (Cunha *et al.*, 2002a) aponta como desenvolvimento de investigação prioritário, na sua segunda fase, o estudo dos impactos das alterações climáticas nos recursos hídricos subterrâneos, nomeadamente no domínio da avaliação da recarga, tendo em conta as tendências previstas da variação da pluviometria para os diferentes cenários climáticos e o risco de intrusão salina em aquíferos costeiros, devido à prevista subida do nível do mar. Igualmente devem ser considerados, para vários cenários climáticos, os riscos de salinização, que poderá ocorrer nos aquíferos em consequência das altas temperaturas e dos valores elevados de evapotranspiração.

Estes prováveis efeitos já tinham sido referidos no estudo do IPCC anteriormente referido quando chama a atenção para o facto de «apesar da água subterrânea ser a principal origem de água no mundo, tem havido pouca investigação sobre os potenciais efeitos das alterações climáticas neste recurso» (IPCC, 2001). E nesse sentido o IPCC preconiza que «é necessário intensificar a investigação nos domínios

da modelação, das características dos aquíferos, das taxas de recarga, da intrusão salina assim como da monitorização das extracções», indicando que «estes estudos servirão de base para uma avaliação correcta dos impactos das alterações climáticas e da subida do nível médio da água do mar na recarga e nos recursos hídricos subterrâneos» (IPCC, 2001).

O interesse da comunidade científica internacional pelo impacto das alterações climáticas nas águas subterrâneas tem vindo a crescer, tendo a Associação Internacional de Hidrogeólogos (AIH) criado, em Setembro de 2003, um grupo de trabalho específico (Working Group on Groundwater and Climate Change) com o fim de dinamizar a investigação hidrogeológica no domínio das diversas interacções entre águas subterrâneas e mudanças climáticas e de promover o intercâmbio de conhecimento e de experiências entre hidrogeólogos e outros especialistas.

Devido à estreita relação entre os fenómenos climáticos e o ciclo hidrológico são previsíveis os seguintes impactos directos e indirectos das alterações climáticas nas águas subterrâneas:

- alterações no regime de precipitação e de evapotranspiração que irão influenciar a recarga;
- aumento da intensidade da precipitação que poderá conduzir a maior escoamento superficial e menor recarga efectiva;
- alterações dos padrões de vegetação natural e de culturas que irão influenciar a recarga;
- subida do nível médio do mar que irá provocar intrusão salina em aquíferos costeiros e ilhas;
- aumento de fenómenos de cheias que afectará a qualidade da água subterrânea em aquíferos aluvionares;
- alterações da concentração de CO<sub>2</sub> que irão influenciar os processos de dissolução dos carbonatos, aumentando a carsificação;
- alteração das concentrações de carbono orgânico no solo que deverá afectar as propriedades de infiltração dos aquíferos.

No que respeita aos impactos das alterações climáticas sobre a qualidade da água, deve ter-se presente que esta pode vir a degradar-se em consequência de uma subida de temperatura que provocará alterações dos processos bioquímicos nos meios hídricos e um decréscimo do teor de oxigénio dissolvido na água. No entanto, a redução do volume do escoamento onde são rejeitadas as cargas poluentes, igualmente decorrente das alterações climáticas pode, eventualmente, constituir o factor mais importante, ampliando o efeito directo do aumento da temperatura na qualidade da água.

Os problemas de qualidade da água relacionados com a concentração de nutrientes são frequentemente agravados pelas

condições térmicas das albufeiras, geralmente caracterizadas por forte estratificação térmica durante os meses mais quentes do ano, alternando com períodos de mistura total nos meses mais frios. Os gradientes verticais de temperatura são geralmente mais intensos na região meridional de Portugal, onde os períodos de estratificação são também mais longos do que nas regiões do Centro e Norte, em resultado não só das mais elevadas temperaturas do ar, mas também de períodos mais extensos de escoamento muito reduzido. O aumento de temperatura poderá afectar determinados factores relacionados com o crescimento algal ou os ciclos do azoto e do fósforo.

A afluência de poluentes aos cursos de água ou aos aquíferos pode também ser condicionada pelas alterações do regime de precipitação e da respectiva capacidade erosiva. A erosão e o transporte de sedimentos desempenham um papel crucial na afluência de poluentes aos cursos de água, correspondendo a uma parte importante da poluição total da água. Em face das mudanças previstas nos regimes de temperatura e precipitação, é expectável um aumento da erosão dos solos, em resultado não só de períodos estivais mais secos, mas também do incremento da frequência das secas e dos episódios de precipitação intensa. Este aumento da erosão e do transporte de sedimentos conduz a uma maior afluência de poluentes às massas de águas e contribui para o agravamento dos problemas de contaminação e de eutrofização. O resultado final não é, no entanto, evidente, pois um acréscimo de intensidade dos episódios de precipitações extremas pode ser compensado por um decréscimo de precipitação anual.

As cargas poluentes com origem difusa podem também ser afectadas por alterações das práticas agrícolas e dos factores que a estas estão associados: tipos de culturas, tecnologias de irrigação, práticas de controlo de erosão dos solos, tipo e quantidades de pesticidas e nutrientes aplicados nas culturas. Em conjunto, estes factores podem produzir um impacto mais significativo na poluição difusa do que o impacto directo das alterações climáticas. De acordo com Schmidt (2000), na maior parte das situações o problema da erosão é mais sensível às práticas de uso do solo do que às alterações climáticas.

Acresce que, de acordo com Gleick (2000), algumas investigações sugerem que as alterações climáticas podem conduzir a modificações a longo prazo na distribuição e saúde de florestas, dependendo parcialmente da forma como os padrões de temperatura e de escoamento se irão alterar. Ainda de acordo com o mesmo autor, as alterações nas florestas terão impactos significativos a nível local e regional sobre o escoamento superficial, a erosão e salinização do solo e a qualidade das águas subterrâneas, impactos estes que ainda não estão adequadamente avaliados. No caso de Portugal este

tipo de impactos assume particular importância, tendo em conta a elevada área florestal existente e a importância económica deste recurso.

No que se refere aos impactos das alterações climáticas sobre a procura de água, é pouco provável que estas condições de forma importante as necessidades de água para fins domésticos e industriais, mas as necessidades de água para a irrigação poderão ser significativamente afectadas. A previsão da evolução da procura de água no sector agrícola é, no entanto, difícil, pois ela está também ligada à evolução das áreas irrigadas e tipos de culturas adoptados, aspectos que não são apenas condicionados por factores climáticos.

A quantidade de água necessária para a irrigação depende da disponibilidade de água no solo, a qual é fortemente condicionada pela intensidade da precipitação. O acréscimo da evapotranspiração, associado a uma elevação da temperatura, conduz a um aumento da procura de água para a irrigação, mas tendo em conta que um aumento da concentração de CO<sub>2</sub> afecta os mecanismos de utilização de água pelas plantas, o resultado final é difícil de prever. A elevação dos níveis de CO<sub>2</sub> conduz, por um lado, à redução da transpiração das plantas, mas, por outro lado, aumenta o crescimento das plantas e, conseqüentemente, a dimensão das folhas ou seja a área de transpiração. O resultado final destes efeitos opostos também não é claro.

Acresce que as alterações climáticas podem conduzir à substituição de certas culturas por outras melhor adaptadas às novas condições. Porém, o clima não é o único factor que influencia as opções relativamente às culturas e, uma vez mais, não é claro qual será o resultado final.

Existe, contudo, uma crescente convicção de que as alterações climáticas conduzirão a um acréscimo de procura de água para a irrigação. Este problema foi estudado, por exemplo em Espanha por Ayala-Carcedo (2000) que estimou, para 2060, um aumento do consumo de água entre 5 e 10 % nas bacias do Douro, Tejo e Guadiana, se as actuais culturas fossem mantidas.

No que se refere aos impactos sobre os ecossistemas, devem destacar-se os efeitos da alteração da qualidade da água, incluindo a elevação da sua temperatura. Os ecossistemas das regiões costeiras tenderão, além disso, a ser afectados pela intrusão salina que pode ocorrer devido à provável subida do nível médio do mar.

Em resultado do que se referiu, é forçoso reconhecer que as alterações climáticas vêm condicionar as práticas prevalentes de gestão de recursos hídricos, introduzindo incertezas adicionais e impondo a necessidade do reforço da capaci-

dade de adaptação dos sistemas hídricos às alterações climáticas. O presente estudo insere-se no esforço de investigação que é necessário realizar para promover e suportar esta nova atitude na gestão dos recursos hídricos em Portugal.

Com efeito, a escala adoptada nos estudos do IPCC (IPCC, 2001) e do Projecto ACACIA (Parry, 2000), a que atrás se fez referência, não assegura uma resolução suficiente para avaliar os impactos das alterações climáticas sobre os recursos hídricos à escala nacional ou da bacia hidrográfica. O presente estudo procura ultrapassar esta limitação apresentando previsões de escoamento superficial para várias regiões de Portugal, das variações de recarga, das modificações dos níveis piezométricos e das posições das interfaces em aquíferos localizados em zonas costeiras e estuarinas e da alteração dos graus de vulnerabilidade dos aquíferos à poluição provocada por actividades antropogénicas. Uma análise dos cenários de precipitação permitiu a identificação de algumas tendências gerais relativamente à ocorrência de cheias.

## 3.2 BREVE CARACTERIZAÇÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS DE PORTUGAL CONTINENTAL

### 3.2.1 Introdução

Portugal não é um país pobre em recursos hídricos como provam vários estudos comparativos que o colocam numa posição confortável no que respeita a valores médios da disponibilidade de água. Quando comparado com outros países europeus ou com os países da bacia mediterrânica, Portugal apresenta valores de escoamento médio anual, global ou *per capita*, superiores aos valores, por exemplo, da França, Itália, Espanha e Grécia (Cunha, 2003).

As características climáticas, geomorfológicas, geológicas e socioeconómicas do país colocam, no entanto, um conjunto de desafios.

A disponibilidade do recurso água varia significativamente no espaço e no tempo. A precipitação anual média é cerca de cinco vezes maior na região Norte-Atlântica do país que no interior Sul e a precipitação anual pode variar cerca de três vezes de ano para ano. Esta variabilidade exige soluções de armazenamento de água para fazer face às frequentes situações de escassez hídrica e a promoção de políticas de gestão da água que compatibilizem a necessidade de água com a sua disponibilidade.

No que respeita à disponibilidade de água, é ainda necessário ter em conta que 65 % do território continental é abrangido

pelas grandes bacias hidrográficas luso-espanholas que têm as suas regiões de montante em Espanha. Em consequência, cerca de 60 % do escoamento anual tem origem no país vizinho, o que obriga Portugal a encontrar formas de cooperação que salvaguardem os seus interesses nesta área.

A concentração da população no litoral do país e, em particular, em torno dos grandes pólos urbanos de Lisboa e Porto coloca problemas adicionais de desequilíbrio entre a necessidade e a disponibilidade de água, assim como de tratamento e depuração dos efluentes domésticos e industriais.

Aliás, a falta de preocupação com as questões da qualidade da água que tem subsistido em Portugal durante muitos anos, conduziu a várias situações de degradação dos recursos superficiais e subterrâneos, tornando-os indisponíveis para a sua utilização.

As alterações climáticas podem vir a contribuir para um agravamento de todas estas situações e para um incremento das dificuldades de gestão da água em Portugal. Sem um conhecimento profundo da realidade actual e da sua possível evolução, este desafio não poderá ser ultrapassado.

### 3.2.2 Unidades Hidrológicas

#### 3.2.2.1 Bacias Hidrográficas

O território português é dominado pelas bacias hidrográficas dos seus três grandes rios internacionais: o Douro, o Tejo e o Guadiana (Figura 3.1). Com uma área agregada de 54 360 km<sup>2</sup> em Portugal, estas bacias abrangem cerca de 60 % do território continental. No entanto, apenas 22 % da área total destas bacias se situa em Portugal (Tabela 3.1).

As características destas três bacias internacionais são bem distintas. O rio Douro, com os seus vales encaixados e caudal elevado, proporciona condições que ao longo dos anos têm sido aproveitadas para a instalação de barragens para fins de produção de energia eléctrica e que actualmente asseguram uma percentagem significativa da produção eléctrica nacional.

A bacia do rio Tejo é a maior bacia do país e marca a transição entre o Norte mais húmido e o Sul mais seco. O rio Tejo entra em Portugal logo a jusante das albufeiras espanholas de Alcantara e Cedillo, a primeira das quais com uma grande capacidade de armazenamento. Desenvolve-se num vale cada vez mais largo que a jusante de Santarém é inundado em situações de cheia. Junto à sua foz, e em redor do estuário, está instalada uma das mais importantes áreas industriais do país.

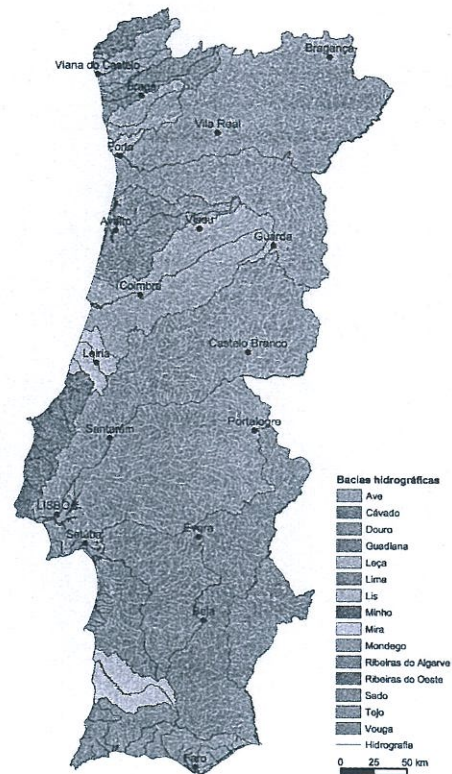


Figura 3.1 – Principais bacias hidrográficas de Portugal Continental

A bacia do Guadiana apresenta um dos valores mais baixos de precipitação média e uma forte variabilidade sazonal e interanual de escoamento. Para fazer face a esta variabilidade e para promover a actividade agrícola, Espanha e Portugal optaram por construir grandes barragens que artificializaram de forma significativa o regime de escoamento deste rio. Com a recente construção da barragem de Alqueva, o volume de armazenamento existente nesta bacia ascende a 14 500 hm<sup>3</sup>, distribuídos por 4500 hm<sup>3</sup> em Portugal e 10 000 hm<sup>3</sup> em Espanha.

As duas outras bacias internacionais são as do Minho e a do Lima. A primeira desenvolve-se sobretudo em Espanha, enquanto a segunda se situa quase exclusivamente em Portugal. Estas bacias, em conjunto com as bacias do Cávado, Lima, Ave e Leça, são aquelas que apresentam os valores mais elevados de precipitação média. Aproveitando o escoamento resultante desta pluviosidade e as características montanhosas desta região, foram instaladas diversas unidades de produção hidroeléctrica que garantem uma percentagem importante das necessidades energéticas nacionais.

A bacia do Mondego é a maior bacia inteiramente nacional. Com as suas origens na serra da Estrela, o rio Mondego é controlado por um aproveitamento de fins múltiplos cons-

**Tabela 3.1 – Características das principais bacias hidrográficas de Portugal Continental (INAG, 2001)**

Bacia	Área total (km <sup>2</sup> )	Área em Portugal (km <sup>2</sup> )	Precipitação em Portugal (mm)	População em Portugal (1998)	Densidade populacional (hab/km <sup>2</sup> )
Minho	17 080	850	1954	82 760	101
Lima	2 480	1 180	2208	167 740	107
Cávado	1 699	1 699	2172	450 890	265
Ave	1 459	1 459	1830	551 550	378
Leça	236	236	1334	271 100	1151
Douro	97 600	18 600	1016	1 932 700	103
Vouga	3 706	3 706	1533	702 260	190
Mondego	6 878	6 878	1124	693 690	101
Lis	1 009	1 009	964	180 060	178
Tejo	80 600	25 161	884	803 970	112
Ribeiras do Oeste	2 395	2 395	821	2 812 850	336
Sado	8 295	8 295	622	292 960	35
Mira	1 767	1 767	689	23 950	14
Guadiana	66 800	11 600	568	182 950	16
Ribeiras do Algarve	2 837	2 837	840	324 100	84

truído na década de 1970 para garantir o abastecimento urbano, industrial e agrícola da região, mitigar o problema das cheias do Baixo Mondego entre Coimbra e Figueira da Foz e produzir energia.

O rio Vouga desenvolve-se em vale encaixado até à foz do rio Caima, espalhando-se a jusante em redor da ria de Aveiro, numa planície onde está instalada a zona industrial de Estarreja, que inclui várias unidades industriais poluentes.

A bacia do Lis é uma pequena bacia com um regime de escoamento controlado pelo maciço cársico da serra dos Candeeiros. Apresenta graves problemas de qualidade da água devido à instalação de um conjunto de unidades de suinicultura.

As bacias do Sado e do Mira apresentam valores muito baixos de precipitação média. A partir do final da década de 1940 foram construídos alguns aproveitamentos hidro-agrícolas que actualmente asseguram cerca de 800 hm<sup>3</sup> de armazenamento e beneficiam uma área de 36 500 ha.

As ribeiras costeiras do Oeste abrangem a zona de Torres Vedras e Caldas da Rainha e as bacias dos rios Sisandro e Lisandro.

As bacias das ribeiras do Algarve abrangem todo o Algarve, com excepção de parte da zona Leste (Sotavento) que faz parte da bacia do Guadiana. Nesta região é de destacar a bacia do rio Arade e a ria Formosa.

### 3.2.2.2 Unidades Hidrogeológicas

Do ponto de vista hidrogeológico, ocorrem em Portugal sistemas geológicos de vários tipos (poroso, fissurado e cársico) que condicionam o armazenamento e a transmissão da água subterrânea. Existem observatórios singulares de interacção com outros meios aquáticos em diversos ambientes climáticos como sejam os rios, os estuários e os oceanos e manifestações significativas de fenómenos de características hidrominerais e hidrotermais.

Portugal Continental está dividido em quatro grandes unidades hidrogeológicas – o Maciço Antigo, a Orla Ocidental, a Orla Meridional e a Bacia do Tejo-Sado (Figura 3.2) –, que se analisam a seguir, e onde se incluem os sistemas aquíferos representados na Figura 3.3.

#### Maciço Antigo

No Maciço Antigo predominam as rochas ígneas e metamórficas. Embora consideradas como impermeáveis estas formações têm uma capacidade de armazenamento não desprezável, quer nas zonas de alteração superficial quer no sistema de fracturas que as afectam, e que se traduz pela regularização do escoamento dos cursos de água que as atravessam, garantindo um caudal mínimo em rios que fluam em regiões semiáridas como o Alentejo durante os períodos de estiagem (Alves *et al.*, 2002).

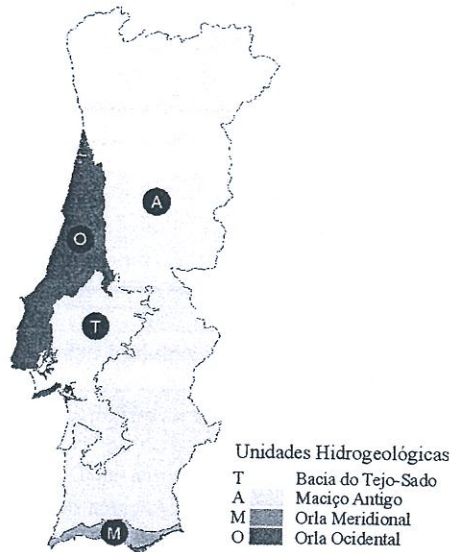


Figura 3. 2 – Unidades hidrogeológicas

A água que circula por esses sistemas de fracturas dá origem muitas vezes a numerosas nascentes que debitam durante todo o ano pequenos caudais. Claramente associado a estes acidentes estruturais está ainda o surgimento de importantes nascentes termais. Dada a elevada complexidade dessas formações, que se traduz em geral pela extrema dificuldade em estabelecer modelos conceptuais de circulação de água minimamente credíveis, o conhecimento desses meios hidrogeológicos é ainda muito limitado. No seio dessas formações surgem, contudo, unidades aquíferas com um interesse hidrogeológico relevante, associadas a rochas calcárias, a gabros, a terraços e a cascalheiras que ocupam depressões do soco antigo e a outras formações jurássicas e terciárias. O aquífero de Veiga de Chaves é um desses exemplos.

Uma intensa campanha de investigação, inventariação, recolha e análise de dados hidrogeológicos, realizada no âmbito do Estudo dos Recursos Hídricos Subterrâneos do Alentejo (ERHSA, 2001), permitiu identificar no Maciço Antigo da região alentejana novas formações aquíferas em áreas constituídas por rochas metamórficas e ígneas que modificaram significativamente a paisagem hidrogeológica desta área.

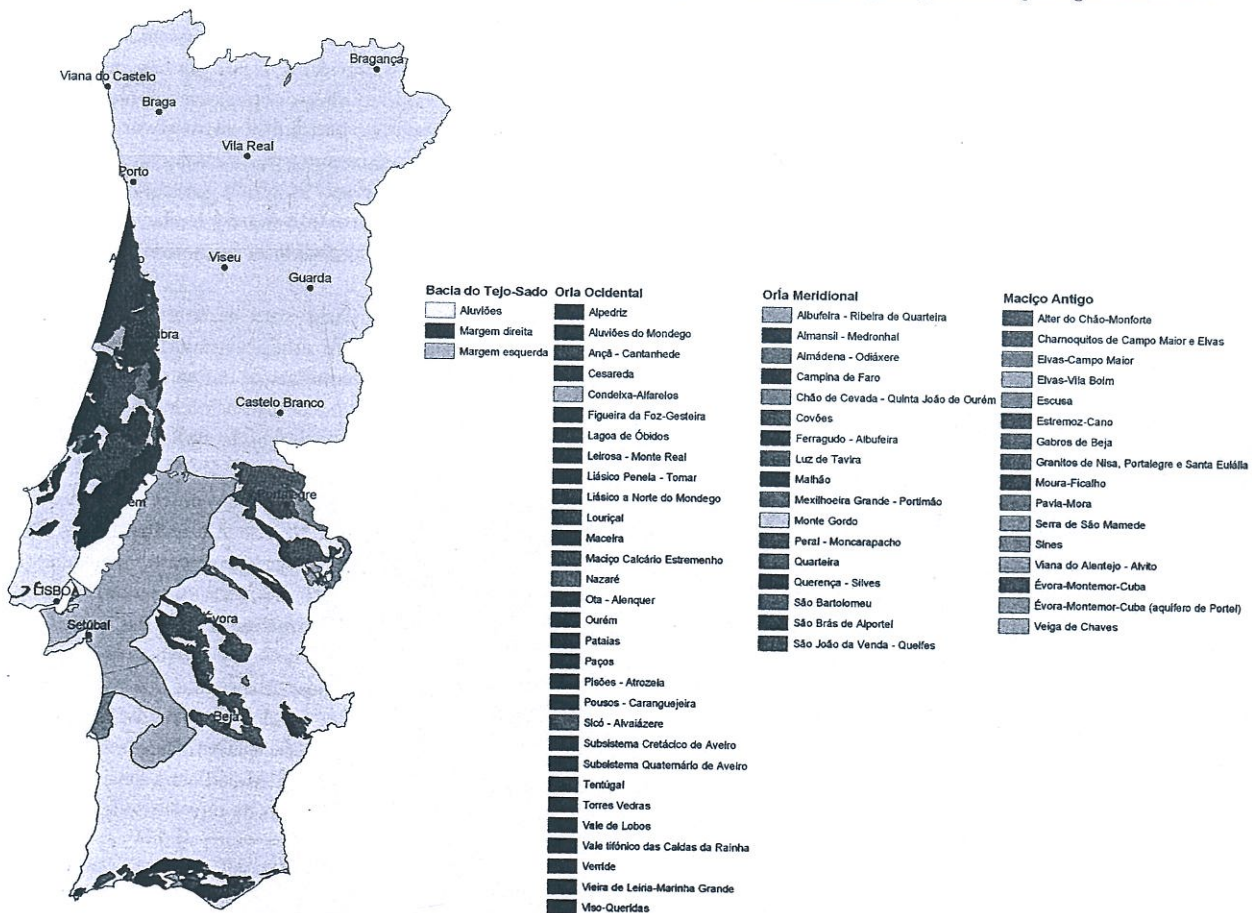


Figura 3.3 – Sistemas aquíferos de Portugal Continental (INAG, 1997)

### Orla Ocidental

Na Orla Ocidental existe uma grande variedade de formações que constituem o suporte de 28 sistemas aquíferos: unidades detríticas de idade terciária e quaternária; arenitos e calcários cretácicos e calcários do jurássico. Esta diversidade hidrogeológica é responsável pela grande heterogeneidade das formações aquíferas e por uma paleta hidrodinâmica muito rica, com óbvios reflexos nos funcionamentos hidráulicos dos sistemas aquíferos que aí se situam. Estas circunstâncias tornam a Orla Ocidental uma paisagem hidrogeológica ímpar no país.

### Orla Meridional

A Orla Meridional é constituída por formações detríticas e carbonatadas de um modo geral muito produtivas na qual foram delimitados 17 sistemas aquíferos. Contrariamente ao que se passa na Orla Ocidental esta unidade hidrogeológica é caracterizada pela sua grande homogeneidade litológica: 16 dos 17 sistemas aquíferos possuem características cársicas ou parcialmente cársicas.

### Bacia do Tejo-Sado

A bacia do Tejo-Sado é constituída por formações detríticas de idade terciária e quaternária. É aqui que se situa o mais extenso sistema aquífero da Península Ibérica: o sistema da bacia do Tejo-Sado. Para além deste foram identificados mais quatro sistemas aquíferos todos eles de características porosas, contribuindo pela sua extensão, espessura e produtividade para tornar a bacia do Tejo-Sado a mais importante unidade hidrogeológica do país.

**Tabela 3.2 – Percentagem da área total coberta pelos sistemas aquíferos agrupados por tipos litológicos (INAG, 1972)**

Tipo litológico	%
Cársico	11
Poroso-Cársico	22
Poroso	60
Poroso-Fissurado	2
Cársico-Fissurado	5

Dos 62 sistemas aquíferos já identificados 21 são sistemas cársicos, 22 são porosos, 13 têm comportamento misto poroso-cársico, cinco são cársico-fissurados e um é poroso-fissu-

rado. Em termos de extensão geográfica, a Tabela 3.2 mostra que os aquíferos porosos são os que ocupam uma maior parcela (60 %) da área coberta pela totalidade dos sistemas (cerca de 18 000 km<sup>2</sup>).

### Funcionamento Hidráulico dos Aquíferos

A diversidade hidrogeológica do país, representada na variedade das formações litológicas onde ocorrem os aquíferos, é seguramente responsável pela existência de vários tipos de funcionamento hidráulico, pela multiplicidade de conexões hidráulicas com outros subsistemas, pela variabilidade das produtividades observadas e pela variedade dos sentidos de fluxo.

Da totalidade dos sistemas aquíferos, cerca de metade funcionam como aquíferos monocamada em regime livre ou confinado, enquanto os restantes são sistemas multicamada, apresentando muitos deles importantes conexões hidráulicas entre as unidades aquíferas que os compõem.

Como é óbvio, os mecanismos de drenância (intercâmbio de água entre camadas) desempenham um papel fulcral no escoamento da água subterrânea, sendo por esse motivo uma componente de modo nenhum negligenciável nos balanços hídricos desses sistemas. Nesse âmbito, deve-se enfatizar o papel que a drenância tem no funcionamento hidráulico, quer em regime natural quer induzida por exploração intensiva, em aquíferos como o sistema da bacia do Tejo-Sado (margem esquerda) ou o subsistema cretácico de Aveiro.

Algumas unidades aquíferas com carácter confinante ou semiconfinante apresentam ainda artesianismo repuxante, um indicador que esses sistemas se encontram subexplorados. Em períodos que antecederam o início da sua exploração estes fenómenos eram mais frequentemente visíveis.

Pela sua importância no funcionamento hidráulico, há a referir alguns aspectos hidrodinâmicos relativamente aos sistemas cársicos e aluvionares. No primeiro caso, há a salientar o papel relevante das nascentes no funcionamento hidráulico daqueles sistemas que debitam em média caudais apreciáveis. É na unidade hidrogeológica da Orla Ocidental que ocorrem as nascentes mais importantes, associadas aos sistemas cársicos do Liásico, a norte do Mondego, de Ançã-Cantanhede, do Liásico Penela-Tomar, de Sicó-Alvaiázere e do Maciço Calcário Estremenho. Na Orla Meridional deve referir-se, pela sua importância, o conjunto de nascentes de Estômbar do sistema Querença-Silves.

Quanto aos sistemas aluvionares, há a referir a sua interdependência com os cursos de água com os quais estão

conectados, revelando características efluentes ou influentes conforme o funcionamento hidráulico sazonal daqueles sistemas hidrológicos. De entre estes salientam-se o sistema das aluviões do Mondego e o sistema aluvionar do rio Tejo.

### 3.2.3 Ciclo Hidrológico

#### 3.2.3.1 Precipitação

A precipitação anual média em Portugal é cerca de 960 mm, mas apresenta uma variação espacial muito acentuada, entre cerca de 2200 mm na bacia do Lima e Cávado e 550 mm na bacia do Guadiana e no interior da bacia do Douro. A bacia do rio Tejo marca a transição entre o Norte húmido e o Sul seco.

A esta variabilidade espacial junta-se a variabilidade temporal, quer sazonal quer interanual. O semestre húmido, que decorre entre Novembro e Abril, regista 70 % do valor da precipitação anual. A precipitação mensal média apresenta o seu valor mais elevado em Dezembro ou Janeiro, sendo o mínimo observado em Julho ou Agosto.

A variabilidade interanual da precipitação também é significativa. A precipitação anual sobre o território continental variou entre 550 mm e 1450 mm no período de 1941-1942 a 1990-1991 e cerca de 25 % dos valores de precipitação anual situaram-se abaixo de 800 mm ou acima de 1100 mm. Em termos relativos, a variabilidade aumenta de norte para sul.

#### 3.2.3.2 Escoamento Superficial

De acordo com o Plano Nacional da Água (PNA), os 960 mm de precipitação sobre Portugal Continental dão origem a cerca de 385 mm de escoamento superficial (INAG, 2001). Este valor resulta da soma do escoamento superficial que ocorre imediatamente após os períodos pluviosos e da contribuição retardada dos aquíferos subterrâneos.

A variabilidade espacial do escoamento superficial acompanha a variação de precipitação, com o Noroeste do país a apresentar valores de escoamento superiores a 1000 mm e a região do Alentejo a apresentar valores inferiores a 200 mm.

Estes valores anuais estão associados a uma forte sazonalidade. Cerca de 70 % do valor anual está concentrado nos quatro meses do período de Dezembro a Março e cerca de 85 % nos seis meses de Novembro a Abril.

No que respeita à variabilidade interanual do escoamento, esta é mais acentuada do que a variabilidade da precipitação anual. A relação entre o escoamento dos anos mais húmidos (percentil 90 %) e o dos anos mais secos (percentil 10 %) varia entre cerca de 3, no Noroeste de Portugal, e valores superiores a 10, a sul do Tejo.

Nas bacias internacionais, aos valores de escoamento gerado em Portugal é necessário adicionar a contribuição proveniente de Espanha. Em termos de volume, afluem a Portugal, em regime natural, cerca de 53 km<sup>3</sup> de água, que se adicionam a cerca de 30 km<sup>3</sup> gerados em Portugal. Os rios que mais contribuem são o Douro, o Minho e o Tejo, respectivamente com 14, 11 e 11 km<sup>3</sup> (MMA, 1998).

#### 3.2.3.3 Recarga de Aquíferos

A recarga pode-se definir como a água infiltrada que, escoando verticalmente, vai atingir a superfície freática. Trata-se da parcela de água infiltrada que resta depois de deduzida a quantidade evapotranspirada.

A estimação da recarga revela-se no entanto de grande dificuldade já que não existe uma metodologia segura para a sua correcta avaliação. Identificam-se em geral as seguintes fontes de recarga num sistema hidrogeológico:

- precipitação directa;
- cursos de água e lagos;
- fluxos interaquíferos incluindo fenómenos de drenância;
- retornos de regas;
- infiltrações de águas residuais urbanas e industriais.

Em virtude da escassez de dados só é possível estimar valores médios de recarga efectiva por precipitação, nomeadamente através da decomposição de hidrogramas, de balanços hídricos a nível do solo, de balanços geoquímicos como o de cloretos, ou, ainda, através métodos expeditos baseados em critérios puramente litológicos.

Os valores de recarga estimados para Portugal Continental oscilam entre os 5 % para os xistos até valores superiores a 50 % para as formações cársicas. Na Figura 3.4 estão representados diagramas de extremos e de quartis dos valores da taxa de recarga estimados nas quatro unidades hidrogeológicas. Nota-se que a maior dispersão ocorre nas Orlas Ocidental e Meridional.

#### 3.2.3.4 Produtividade dos Sistemas Aquíferos

Entende-se por produtividade de um sistema aquífero a sua capacidade de fornecer um determinado caudal por unidade

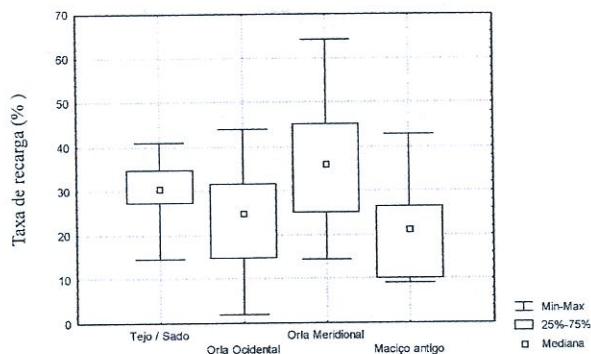


Figura 3.4 – Diagramas de extremos e de quartis construídos com base em taxas de recarga estimadas para as quatro unidades hidrogeológicas

de tempo, e é calculada, na prática, com base nos caudais de exploração das captações existentes no aquífero.

A Figura 3.5 apresenta um conjunto de valores de caudais de exploração sugeridos em relatórios de sondagens. É patente que os sistemas de características porosas são, em média, os mais produtivos, com um valor de mediana de 13,3 l/s, seguindo-se os sistemas mistos cársico-porosos com 7,2 l/s e os cársicos com 6,3 l/s.

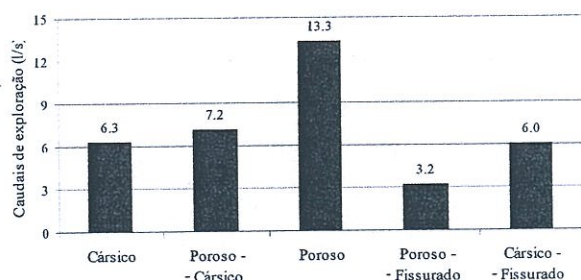


Figura 3.5 – Mediana dos valores de caudais de exploração dos sistemas aquíferos agrupados por tipos litológicos

Na unidade do Maciço Antigo, os valores mais elevados de produtividade ocorrem nos sistemas aquíferos cársicos alentejanos de Escusa e de Moura Ficalho, com cerca de 15 l/s, e no sistema poroso da Veiga de Chaves, com caudais de exploração que atingem os 30 l/s.

Na Orla Meridional algarvia deve realçar-se, pela sua extensão geográfica (aprox. 300 km<sup>2</sup>) e pelo seu grau de produtividade, o sistema aquífero de Querença-Silves, com uma mediana de valores da ordem dos 12 l/s.

Na Orla Ocidental, os maiores valores de produtividade ocorrem nos sistemas aluviões do Mondego (mediana de 30

l/s), Vieira de Leiria-Monte Real (20 l/s), Leirosa-Monte Real (15 l/s), vale tifónico das Caldas da Rainha (13 l/s) e da Nazaré (10 l/s).

A bacia do Tejo-Sado abrange os sistemas aquíferos mais produtivos do país, com valores médios de produtividade da ordem dos 40 l/s que ocorrem sobretudo na unidade aquífera confinada do Miocénico.

### 3.2.4 Disponibilidades Hídricas

#### 3.2.4.1 Disponibilidades Hídricas Superficiais

Dada a grande variabilidade temporal das variáveis hidro-lógicas, o conceito de disponibilidades hídricas superficiais deve ser sempre associado ao conceito de garantia, isto é, ao valor da probabilidade de existirem condições para satisfazer um determinado volume de necessidades de água.

Nas bacias em que não houve intervenção humana sobre o sistema de recursos hídricos, este valor de garantia resulta directamente da análise estatística das séries de escoamento natural. O valor de disponibilidade anual associado a uma garantia de 90 % corresponde ao percentil 10 % da curva de distribuição do escoamento anual. Nos anos em que o escoamento é inferior ao valor daquele percentil não é possível garantir aquele valor das disponibilidades hídricas.

No entanto, a satisfação de um determinado volume anual não significa que sejam satisfeitas as necessidades ao longo de todo o ano, uma vez que a variação sazonal do escoamento em geral não coincide com a distribuição das necessidades. Antes pelo contrário: é na Primavera e no Verão, quando o escoamento é mais baixo, que a necessidade de água é mais elevada.

A construção de barragens permite aumentar o valor da disponibilidade hídrica associado a determinados valores de garantia e garantir a satisfação das necessidades de água ao longo de todo o ano. A gestão criteriosa das albufeiras criadas por estas infra-estruturas permite armazenar os excedentes de água nos períodos mais húmidos para os libertar nos períodos mais secos e complementar as disponibilidades naturais na satisfação das necessidades de água.

A capacidade de armazenamento em albufeiras existente em Portugal Continental é cerca de 12 000 hm<sup>3</sup>. As albufeiras de Alqueva (4100 hm<sup>3</sup>) e de Castelo de Bode (1000 hm<sup>3</sup>) representam por si só uma percentagem significativa deste valor global. As bacias do Guadiana, Tejo, Cávado e Mondego são aquelas onde existe a maior capacidade de armazenamento (Tabela 3.3).

Tabela 3.3 – Capacidade de armazenamento instalada (INAG, 2001)

Bacia	Capacidade armazenamento das albufeiras (hm <sup>3</sup> )		Escoamento na foz (hm <sup>3</sup> )	Coeficiente de regularização
	Portugal	Espanha		
Minho	0	2 810	12 109	0,2
Lima	400	150	3 529	0,2
Cávado	1 180	-	2 099	0,6
Ave	100	-	1 228	0,1
Leça	0	-	104	0,0
Douro	1 078	6672	22 852	0,3
Vouga	1	-	1 908	0,0
Mondego	540	-	4 330	0,1
Lis	0	-	260	0,0
Ribeiras do Oeste	1	-	300	0,0
Tejo	2 750	11 140	17 044	0,8
Sado	771	-	972	0,8
Mira	486	-	196	2,5
Guadiana	4 560	9 920	7 357	2,0
Ribeiras do Algarve	63	-	348	0,2
<b>Contínente</b>	<b>11 930</b>		<b>74 636</b>	

O aumento das disponibilidades hídricas superficiais em bacias com um elevado grau de artificialização, decorrente da capacidade de armazenamento instalada, depende da relação entre essa capacidade, a média do escoamento em regime natural e a variabilidade em torno da média do escoamento em regime natural. Quanto maior for a relação entre a capacidade de armazenamento e o valor médio do escoamento (coeficiente de regularização), assim como entre a capacidade de armazenamento e a variação em torno da

média do escoamento, maior será o aumento da disponibilidade hídrica.

O cálculo deste aumento exige a simulação de todo o sistema de recursos hídricos, incluindo a operação das albufeiras existentes na bacia. Para isso é necessário estimar o escoamento natural gerado nas principais sub-bacias, adoptar determinadas políticas de operação das albufeiras e estimar as perdas por evaporação. Nas bacias internacionais este tra-

Tabela 3.4 – Disponibilidades hídricas superficiais (INAG, 2001)

Bacia	Escoamento anual na foz com garantia de 90 % (hm <sup>3</sup> )		Escoamento anual na foz com garantia de 80 % (hm <sup>3</sup> )	
	Regime natural	Regime regularizado	Regime natural	Regime regularizado
Minho	5 938	n.d.	7 276	n.d.
Lima	1 605	2110	1 947	2462
Cávado	1 089	1769	1 432	1960
Ave	546	612	722	794
Leça	37	38	56	60
Douro	12 471	n.d.	16 278	n.d.
Vouga	675	721	1 092	1108
Mondego	911	1452	2 166	2342
Lis	49	63	93	121
Ribeiras do Oeste	113	131	154	163
Tejo	10 004	n.d.	11 845	n.d.
Sado	19	612	182	716
Mira	0	268	60	289
Guadiana	1 051	n.d.	1 744	n.d.
Ribeiras do Algarve	25	105	104	160

balho é prejudicado pela dificuldade de obtenção de dados relativos a Espanha, designadamente de consumos de água.

No âmbito dos trabalhos do PNA, foram realizados esforços no sentido de quantificar este aumento, adoptando uma metodologia simplificada que assume que toda a capacidade de armazenamento está instalada na foz da bacia. A Tabela 3.4 apresenta os resultados desse esforço, sendo de reforçar o carácter aproximado dos resultados.

A análise da Tabela 3.4 revela que as bacias com maiores disponibilidades hídricas são as bacias do Douro, Tejo e Minho. A bacia do Sado é aquela que apresenta um maior aumento relativo das disponibilidades hídricas em resultado da capacidade de armazenamento instalada.

### 3.2.4.2 Disponibilidades Hídricas Subterrâneas

Entende-se por disponibilidades hídricas subterrâneas o volume de água subterrânea que o aquífero ou a formação hidrogeológica pode fornecer em condições naturais, em resultado da recarga por infiltração da precipitação.

A Figura 3.6 apresenta a distribuição das disponibilidades hídricas subterrâneas em Portugal Continental, por classes de valores. Na sua estimação não foram contemplados os volumes provenientes de fenómenos de recarga induzida dos cursos de água, lagos, ou através de aquíferos (formações de permeabilidade reduzida). Apresentam-se os valores em  $hm^3/ano/km^2$ , tendo-se utilizado para o efeito um valor de recarga média anual e a área de afloramento do aquífero

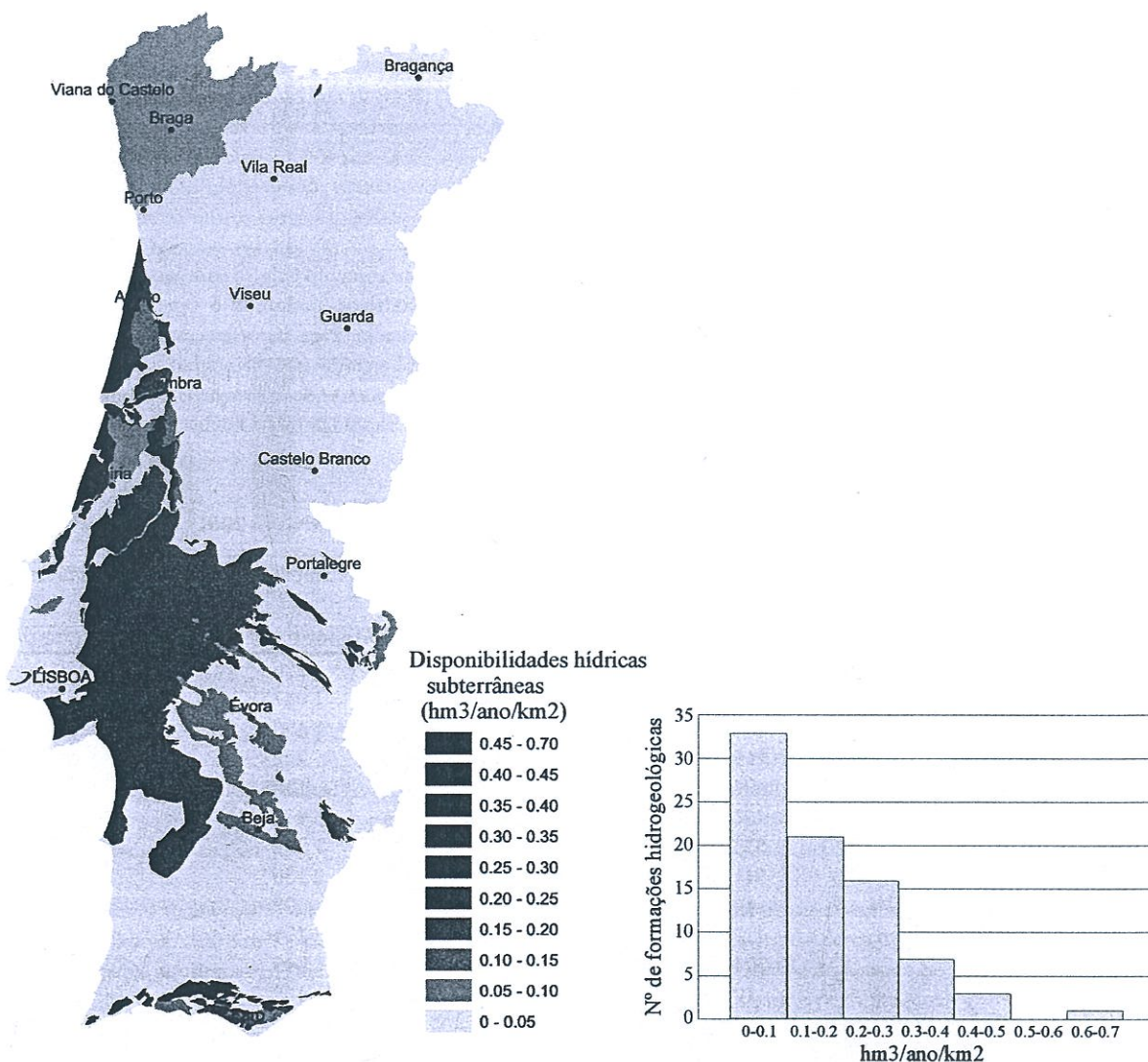


Figura 3.6 – Disponibilidades hídricas subterrâneas de Portugal Continental

ou formação hidrogeológica. Note-se que esta área pode ser diferente da área preferencial de recarga.

Como era de esperar os maiores valores estão associados a aquíferos cársicos e os menores às formações cristalinas que constituem maioritariamente o Maciço Antigo. O histograma de disponibilidade hídrica subterrânea mostra uma distribuição claramente assimétrica com uma mediana de 0,15 hm<sup>3</sup>/ano/km<sup>2</sup>.

### 3.2.5 Necessidades e Consumos de Água

#### 3.2.5.1 Introdução

As utilizações de água mais importantes são o abastecimento humano, o abastecimento industrial, o regadio, o turismo, a produção de energia eléctrica, a aquacultura, a navegação e as actividades recreativas. Para além destas utilizações é ainda necessário referir a manutenção de um regime de escoamento que proporcione condições para um desenvolvimento saudável e sustentável dos ecossistemas aquícolas e ribeirinhos.

O termo «utilização» é aqui usado em sentido genérico, englobando todas as actividades que necessitam do meio hídrico, quer para captar água quer para aproveitar de alguma forma a área inundada, a cota da superfície livre ou a profundidade de água. A maioria das utilizações referidas são consumptivas, no sentido em que utilizam o meio hídrico para captar água, devolvendo apenas uma pequena parcela do volume de água captado. As excepções são a produção de

energia eléctrica, a aquacultura, a navegação e as actividades recreativas.

O PNA estima que as necessidades de água para utilizações consumptivas em Portugal Continental ascendem a cerca de 10 000 hm<sup>3</sup>/ano. Neste valor global destaca-se o regadio, responsável por cerca 87 % das necessidades de água, muito embora este volume não seja inteiramente satisfeito (Tabela 3.5).

#### 3.2.5.2 Abastecimento Público

As necessidades de água para abastecimento urbano incluem as necessidades da população, comércio e serviços satisfeitas pelas redes públicas de distribuição de água, assim como as perdas de águas da rede.

De acordo com o PNA, cerca de 85 % da população residente no Continente é abastecida por água potável, o que corresponde a um valor de consumo de cerca de 560 hm<sup>3</sup>/ano. O valor da capitação varia entre 130 l/hab/dia e 530 l/hab/dia.

Os Planos de Bacia Hidrográfica identificaram 4384 captações no Continente, 267 das quais em águas superficiais e 3394 em águas subterrâneas. Para as restantes 723 captações não foi possível caracterizar o tipo de origem. É evidente o peso significativo dos recursos hídricos subterrâneos na satisfação das necessidades de abastecimento público, quando medido em termos de número de utilizadores.

**Tabela 3.5 – Necessidades de água (hm<sup>3</sup>/ano) (INAG, 2001)**

Bacia	Abastecimento urbano	Abastecimento industrial	Regadio	Turismo	Total
Minho	4	< 1	107	< 1	112
Lima	10	10	214	< 1	235
Cávado	18	3	316	< 1	337
Ave	34	8	364	< 1	407
Leça	26	16	39	< 1	81
Douro	102	34	1793	1	1930
Vouga	39	28	475	< 1	543
Mondego	41	71	832	< 1	944
Lis	10	< 1	69	< 1	79
Oeste	47	4	207	2	260
Tejo	223	147	2655	3	3028
Sado	25	58	588	< 1	672
Mira	1	< 1	126	< 1	128
Guadiana	16	3	536	1	557
Algarve	26	2	410	11	449
<b>Total</b>	<b>623</b>	<b>385</b>	<b>8732</b>	<b>20</b>	<b>9760</b>

No que respeita a volume de água, segundo o último inquérito realizado em 2001-2002 pela Associação Portuguesa de Distribuição e Drenagem de Águas (APDA), junto de todas as entidades gestoras de sistema de abastecimento de água de Portugal Continental (APDA, 2002), a componente de água subterrânea utilizada para o abastecimento público corresponde a 44 % do total de água consumida.

A Figura 3.7 mostra que os concelhos onde o abastecimento público é maioritariamente de origem subterrânea se localizam nos distritos de Setúbal, Leiria, Santarém, Coimbra e Aveiro, isto é, em zonas onde se situam aquíferos de elevada produtividade, como é o caso dos sistemas que integram a Unidade Hidrogeológica da bacia Tejo-Sado e a Orla Ocidental.

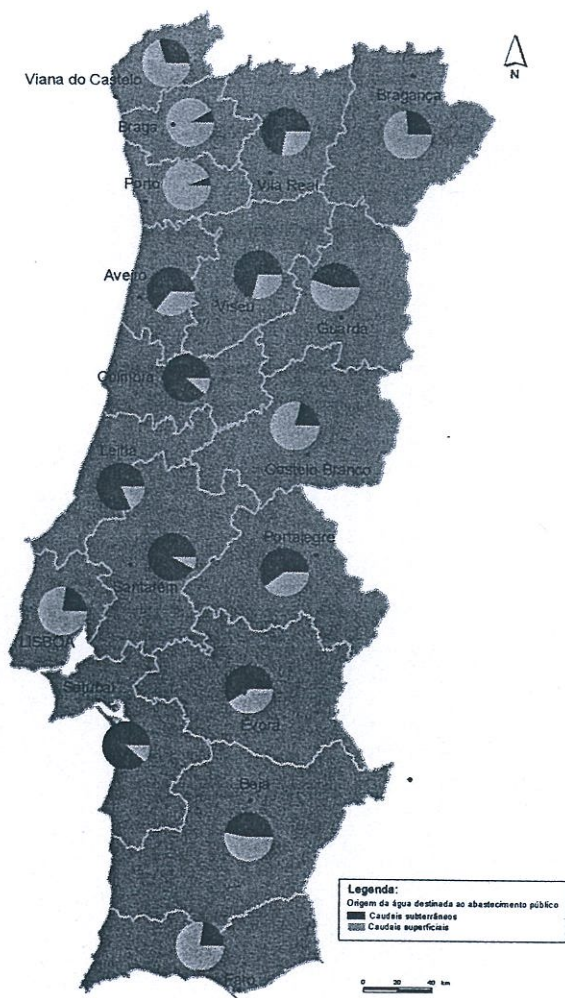


Figura 3.7 – Distribuição por distritos do volume de água para abastecimento público proveniente de captações superficiais ou subterrâneas (APDA, 2002)

### 3.2.5.3 Indústria

O PNA estima que as necessidades actuais da indústria em Portugal Continental rondam os 385 hm<sup>3</sup>/ano. Cerca de 80 % deste valor decorre de apenas quatro sectores: fabrico da pasta de papel, indústria alimentar e de bebidas, indústrias metalúrgicas de base e, ainda, fabricação de produtos químicos.

A Figura 3.8 mostra a distribuição por bacias hidrográficas do volume de água para a indústria proveniente de captações superficiais ou subterrâneas. Os maiores consumos de água subterrânea situam-se nas bacias do Tejo, do Sado e do Douro com valores da ordem dos 132 hm<sup>3</sup>/ano.

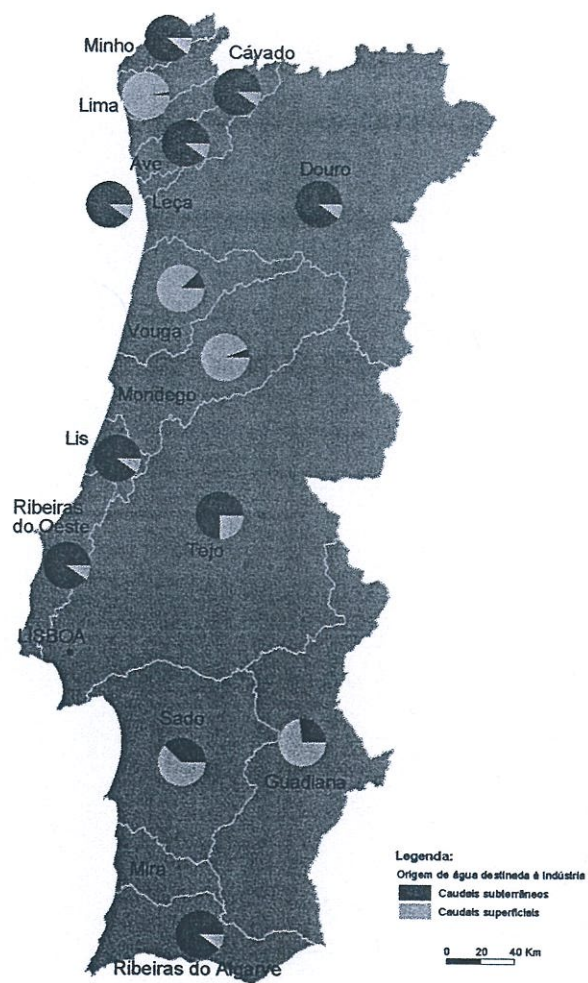


Figura 3.8 – Distribuição por bacias hidrográficas do volume de água para a indústria proveniente de captações superficiais ou subterrâneas (INAG, 2001)

3.2.5.4 Agricultura

A agricultura é a actividade que mais consome água em Portugal Continental. O PNA estima que as necessidades de água para a agricultura sejam cerca de 8730 hm<sup>3</sup>/ano, um peso significativo das necessidades globais de água.

A eficiência de rega é em geral baixa, menor que 65 %, e estima-se que apenas 20 % do volume captado é devolvido ao meio hídrico. As bacias do Tejo e do Douro são aquelas com valores mais elevados de necessidades de água.

Note-se que cerca de 65 % da água utilizada tem origem subterrânea (Figura 3.9). Os volumes mais elevados de consumo de água subterrânea situam-se nas bacias hidrográficas dos rios Tejo, Douro e Mondego.

3.2.5.5 Turismo

As necessidades de água para o turismo incluem o abastecimento de água a infra-estruturas hoteleiras e a campos de golfe. Estas duas parcelas apresentam valores de necessidade semelhantes, sendo as necessidades, em geral, satisfeitas a partir das redes públicas de abastecimento, enquanto o abastecimento a campos de golfe é satisfeito a partir de captações próprias, superficiais ou subterrâneas.

3.2.5.6 Produção de Energia Eléctrica

A indústria de produção de energia eléctrica é um dos maiores utilizadores de água em termos de volume, não obstante o consumo líquido final associado a esta utilização não ser elevado. O consumo de água em centrais hidroeléctricas e nos sistemas de refrigeração de centrais térmicas resulta apenas das perdas por evaporação que ocorrem nestes processos.

Os impactos mais significativos desta actividade no meio hídrico são a modificação do regime de escoamento, a diminuição da qualidade de água resultante das descargas de camadas profundas de albufeiras ou de água aquecida dos sistemas de refrigeração e, ainda, a modificação do regime de transporte sólido fluvial.

3.3 METODOLOGIAS DE ANÁLISE

3.3.1 Introdução

Na avaliação dos impactos das alterações climáticas sobre os recursos hídricos torna-se necessário comparar dois cenários climáticos distintos: um cenário de referência, estável, que se pretende estatisticamente semelhante à situação histórica, e um outro que resulta de uma dada hipótese de aumento da emissão de gases com efeito de estufa.

O cenário de referência adopta a concentração média histórica de CO<sub>2</sub> atmosférico, produzindo assim um cenário climático estacionário, onde cada variável assume diferentes valores durante a simulação, mas em que os parâmetros estatísticos se mantêm inalterados. O outro cenário, designado por cenário perturbado, simula as tendências climáticas associadas a uma dada evolução da concentração de gases com efeito de estufa e, eventualmente, de aerossóis.

Os actuais modelos climáticos são capazes de simular a evolução de um conjunto de variáveis climáticas e hidrológicas em função de alguns factores, em que se inclui a concentração na atmosfera dos gases com efeito de estufa. Permitem,

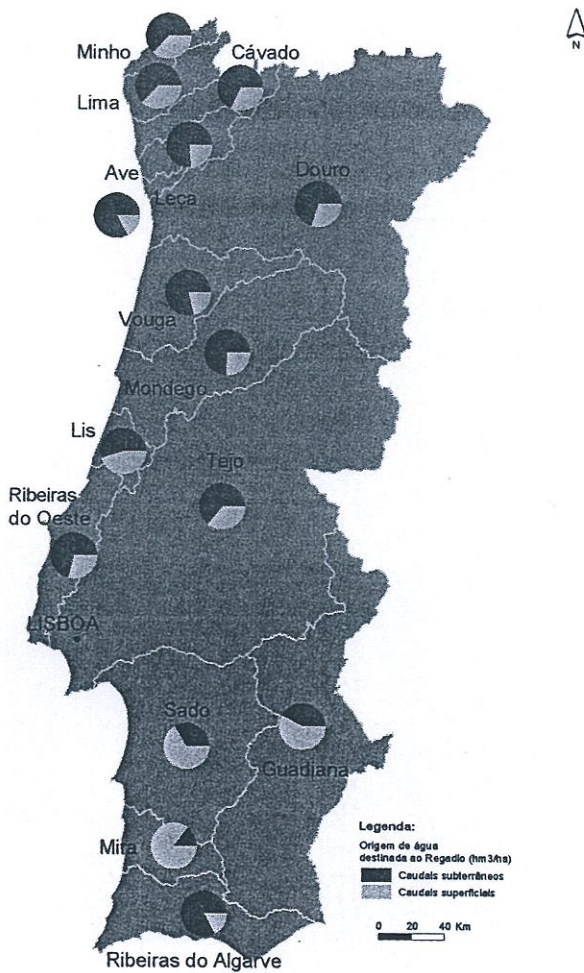


Figura 3.9 – Distribuição por bacias hidrográficas do volume de água para irrigação proveniente de captações superficiais ou subterrâneas (INAG, 2001)

por isso, gerar cenários climáticos distintos para diferentes hipóteses de evolução da concentração de gases com efeito de estufa, resultantes de diferentes opções políticas e de consequentes cenários de desenvolvimento socioeconómico.

Os modelos climáticos avaliam os impactos das alterações climáticas sobre um conjunto de variáveis hidrometeorológicas, mas a escala espacial usada é pouco pormenorizada para permitir estimar os efeitos sobre os recursos hídricos das principais bacias hidrográficas.

Para superar essa dificuldade, os cenários climáticos usados pelas diferentes metodologias neste capítulo resultam da afectação das anomalias climáticas previstas pelos modelos às séries históricas observadas. Deste modo, preserva-se a estrutura espacial do clima, a qual, em caso contrário, seria esbatida pelos modelos climáticos.

### 3.3.2 Escoamento, Recarga e Piezometria

#### 3.3.2.1 Modelo Hidrológico

Para a avaliação do impacto das alterações climáticas na disponibilidade dos recursos hídricos, aplicou-se um modelo hidrológico para simular os processos hidrológicos e estimar o escoamento fluvial de uma bacia em função das variáveis de saída dos modelos climáticos.

O modelo denomina-se Temez e constitui uma simplificação do Stanford Watershed Model (SWM) (Linsley e Crawford, 1960; Crawford e Linsley, 1966). É um modelo agregado que simula à escala mensal os processos hidrológicos que ocorrem numa bacia hidrográfica, tendo como dados de entrada as séries de precipitação mensal e de evapotranspiração potencial mensal da bacia. Os dados de saída do modelo compreendem valores mensais de escoamento, infiltração e evapotranspiração real.

Não obstante ser vocacionado para o escoamento superficial, o modelo estima também a recarga dos sistemas aquíferos, pelo que foi utilizado para uma primeira estimativa dos impactos das alterações climáticas nesta variável.

O modelo tem quatro parâmetros de calibração: coeficiente de excedente, capacidade de campo, taxa máxima de infiltração e taxa de esgotamento do aquífero. Estes quatro parâmetros foram calibrados de modo a obter o melhor ajustamento possível entre a série de escoamento observada e a série calculada, tentando ainda assegurar que o valor médio da taxa de recarga era consentâneo com as condições hidrogeológicas da bacia. Tendo em consideração a litologia de cada uma das sub-bacias estudadas, assim como os sistemas aquíferos

que as integram, definiu-se o parâmetro taxa máxima de infiltração de modo a obter uma maior aproximação entre os resultados do modelo e a recarga real. Deste exercício de calibração resultaram os valores dos parâmetros do modelo para cada uma das bacias consideradas.

Após a calibração, utilizou-se o modelo para simular o ciclo hidrológico de cada bacia para vários cenários climáticos futuros. Estes cenários resultam das séries históricas perturbadas com as anomalias médias previstas pelos modelos climáticos para os diferentes cenários socioeconómicos. Os valores de anomalia são calculados comparando as séries para diferentes cenários com o cenário de referência. No caso da temperatura, a anomalia é a diferença, medida em °C, entre os valores das duas séries, sendo somada aos valores observados. No caso da precipitação, a anomalia é medida em percentagem de aumento, sendo multiplicada pelos valores observados.

Através desta metodologia mantém-se a estrutura espacial do clima, minimizando o erro dos modelos climáticos. Assume-se, no entanto, que a variabilidade interanual das diferentes variáveis climáticas se mantém nos níveis actuais, o que se trata de uma simplificação importante. Com efeito, o eventual aumento desta variabilidade pode condicionar de forma significativa a capacidade dos sistemas em satisfazer as necessidades de água.

Na Figura 3.10 esquematiza-se a metodologia abordada.

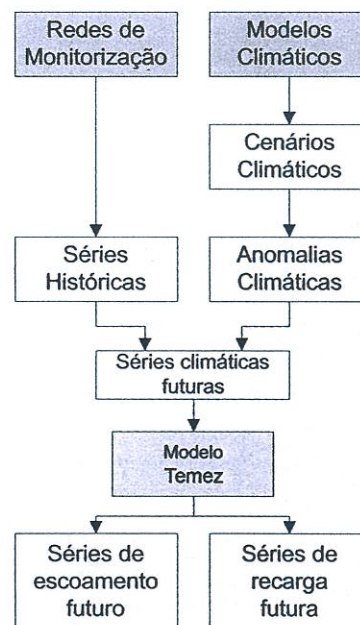


Figura 3.10 – Metodologia utilizada para a avaliação do impacto das alterações climáticas na disponibilidade dos recursos hídricos

Para caracterizar o clima de referência consideraram-se as séries históricas de precipitação e temperatura mensal observadas em mais de 500 estações udométricas e 200 estações climáticas distribuídas por Portugal e Espanha (nas regiões envolventes do território português) relativamente ao período de 1961 a 1990.

Foram estudadas 62 bacias hidrográficas com áreas compreendidas entre 15 e 2000 km<sup>2</sup> distribuídas pelo país, abrangendo vários regimes de escoamento. Todas as bacias estão situadas integralmente em território português e foram agrupadas por regiões mais ou menos homogêneas do ponto de vista hidrológico (Figura 3.11).

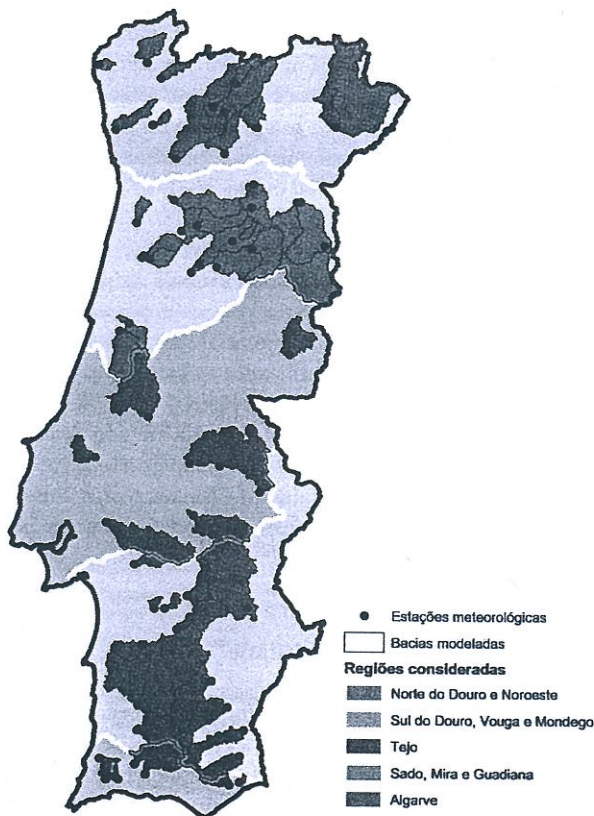


Figura 3.11 – Bacias hidrográficas e regiões consideradas para o estudo

### 3.3.2.2 Análise de Tendências

Para detectar e analisar as tendências de evolução da variável piezometria foram aplicadas ferramentas estatísticas não paramétricas, designadamente os testes de Mann-Kendall, na versão sazonal (Kendall, 1975 e Mann, 1945), e os testes de regressão robusta de Theil e Sen (Theil, 1959 e Sen, 1968).

Esta metodologia possui capacidade suficiente para analisar situações que ocorrem frequentemente nas variáveis hídricas, tais como distribuições estatísticas livres, presença de valores anormais, ausência de valores, ciclicidades, etc. (Hirsch *et al.*, 1982).

O teste de Mann-Kendall permite detectar as tendências, de forma robusta e com correção de sazonalidade, e inferir do grau de significância do acréscimo ou do decréscimo de cada parâmetro. Por sua vez, o método de Theil e Sen permite calcular de modo robusto um valor para o declive da tendência detectada, ou seja, a magnitude da mudança por unidade de tempo, correspondendo esse valor à mediana de todos os declives. O declive assim calculado é resistente a valores extremos e representa tão-somente uma mera indicação, não se devendo concluir daí uma rígida linearidade na alteração dos valores da variável.

Neste trabalho aplicou-se esta metodologia para estimar a resposta dos níveis piezométricos a uma eventual variação das taxas de precipitação. Para tal, calcularam-se os declives mensais das séries históricas de precipitação e de piezometria. Após a análise de tendências, submetem-se os declives a um estudo de correlação cruzada para se conhecer o tempo de resposta do aquífero às variações pluviométricas, resultando daí uma relação linear entre as variáveis. Conhecendo-se a relação entre a variação da precipitação e a variação da piezometria, foi possível inferir qual a variação futura tendo em conta a modificação dos regimes de precipitação. A metodologia está esquematizada na Figura 3.12.

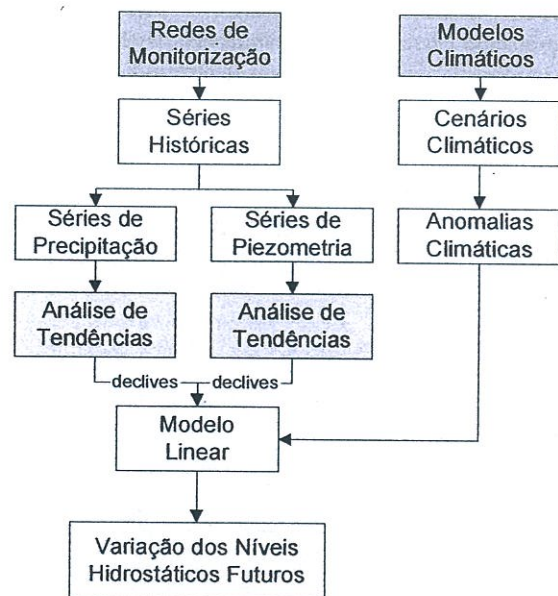


Figura 3.12 – Metodologia utilizada para a avaliação do impacto das alterações climáticas na piezometria

Todas estas técnicas têm sido amplamente aplicadas a casos de estudo portugueses envolvendo diversos tipos de variáveis hidrológicas, hidrogeológicas e hidroquímicas. Podem ser encontradas algumas dessas aplicações nas seguintes referências: Ribeiro e Macedo (1995), Lopes e Ribeiro (1996), Ribeiro e Lourenço (1999), Ribeiro *et al.* (1999), Ribeiro e Benoiel (2000) e Lourenço e Ribeiro (2003).

### 3.3.2.3 Modelos Numéricos

Para simular o escoamento de águas subterrâneas em meios cársicos, utilizou-se um modelo em elementos finitos que permite a simulação em domínios uni, bi e tridimensionais. Esta potencialidade permite a simulação da dualidade dos processos de escoamento observados em meios carbonatados cársicos que se reflecte nos processos de recarga (ocorrência de infiltração difusa e concentrada), no campo vectorial de escoamento no interior do aquífero (rápido em condutas e falhas e lento na massa rochosa) e, finalmente, na ocorrência de descarga concentrada, sobretudo em nascentes cársicas, e difusa no contacto com áreas húmidas e/ou no contacto com unidades hidrogeológicas porosas em conexão hidráulica com o meio cársico.

O escoamento de água subterrânea num meio poroso saturado é descrito por uma equação em derivadas parciais que está baseada na conjugação da lei de Darcy, que exprime a conservação do momento, e a equação da continuidade, que exprime a conservação da massa do fluido.

A técnica de discretização utilizada para simular um aquífero do tipo cársico recorre à utilização de elementos finitos unidimensionais com três nós, elementos bidimensionais com oito nós e elementos tridimensionais hexaédricos com vinte nós (Figura 3.13).

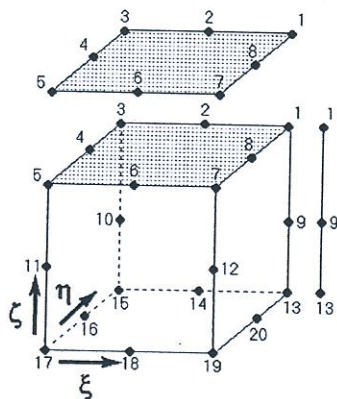


Figura 3.13 – Geometria dos elementos finitos quadráticos utilizados na modelação de um aquífero cársico (Monteiro, 2001)

A modelação de aquíferos cársicos pela combinação da análise do escoamento em canais de dissolução discretos unidimensionais e/ou fracturas bidimensionais, simultaneamente com a representação conceptual de um meio contínuo simples 3-D, exige a reformulação dos modelos matemáticos usualmente empregues para simulação do escoamento subterrâneo. Um método matemático que faculte a possibilidade de efectuar este tipo de simulação, recorrendo à técnica dos elementos finitos, é descrito em Perrochet (1995).

### 3.3.3 Modelos Analíticos

A simulação da interface água doce-água salgada em aquíferos costeiros foi realizada utilizando a aproximação de Ghyben-Herzberg que afirma que num aquífero livre, a profundidade da interface varia linearmente com a altura da água doce acima do nível médio do mar considerando a diferença de densidades entre a água doce e a água salgada. Segundo aquela abordagem a profundidade da interface será igual a 40 vezes a cota piezométrica. A aproximação é válida desde que se cumpra a hipótese de Dupuit (Bear *et al.*, 1999).

No caso dos subsistemas estuarinos, a modelação analítica permitiu estimar a profundidade da lente da água doce em todo o domínio. Assumiu-se que o fluxo é essencialmente horizontal, isto é, as linhas de potencial são verticais (hipótese de Dupuit), tendo sido utilizados os modelos propostos para ilhas oceânicas por Zoppou e Reed (2001), Johnson e Rogers (2000) e Wang e Zheng (1998). Na área do domínio de modelação onde o pressuposto de Dupuit não é válido, nomeadamente na estreita faixa em contacto com o mar, utilizou-se uma alteração simples do modelo proposta por Popov e He (2000).

### 3.3.4 Índice de Susceptibilidade

Para avaliar a vulnerabilidade de aquíferos sujeitos a poluição difusa, originada por actividades agrícolas, foi utilizado o índice de susceptibilidade (IS), desenvolvido no âmbito do Estudo dos Recursos Hídricos Subterrâneos do Alentejo por Ribeiro (2000). Na sua génese esteve a necessidade de munir os decisores com um novo instrumento que fosse uma alternativa mais realista aos índices de vulnerabilidade correntemente em uso.

O IS consiste numa adaptação do índice de vulnerabilidade DRASTIC (Aller *et al.*, 1987). A principal alteração no IS face ao DRASTIC é o acréscimo de um parâmetro de ocupação do solo, abandonando assim o conceito de um índice puramente intrínseco (baseado unicamente nas condições naturais). Por outras palavras, o IS foi desenvolvido com o

objectivo de avaliar a vulnerabilidade específica, definida segundo Vrba e Zoporozec (1994) pelos impactos potenciais do uso específico dos solos e dos contaminantes associados a esse uso.

O IS é calculado pela soma ponderada de cinco parâmetros. Os primeiros quatro parâmetros (profundidade do nível freático, recarga, material do aquífero e topografia) são extraídos directamente do DRASTIC. O quinto e novo parâmetro LU (Land Use) define a ocupação do solo. Esta é definida conforme a classificação dada pela carta CORINE Land Cover.

Finalmente, os pesos atribuídos a cada parâmetro são distintos dos do método DRASTIC já que provém dum novo painel DELPHI constituído por técnicos e especialistas portugueses na área de hidrogeologia.

O IS tem sido aplicado com sucesso em Portugal em vários estudos: para avaliar o grau de susceptibilidade à contaminação agrícola no sistema aquífero dos gabros de Beja (Francés *et al.*, 2002, Serra *et al.*, 2003), nos aquíferos da zona do Ribatejo (Paralta *et al.*, 2001), na identificação das áreas mais susceptíveis à implantação de campos de golfe no concelho de Albufeira, localizado no Algarve, Portugal (Stigter *et al.*, 2002), nos aquíferos da Campina de Faro e de Luz de Tavira (Stigter *et al.*, 2004)

A Figura 3.14 esquematiza a metodologia abordada.

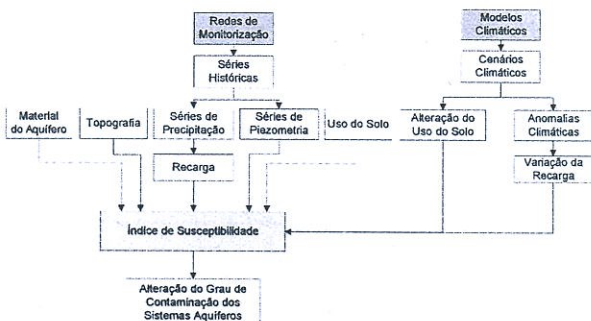


Figura 3.14 – Metodologia utilizada para a avaliação do impacto das alterações climáticas na vulnerabilidade dos aquíferos à contaminação agrícola

### 3.3.5 Risco de Cheias

No território de Portugal Continental ocorrem com alguma regularidade situações de cheia que provocam elevados danos materiais e, por vezes, perda de vidas humanas. Na origem destas situações estão fenómenos de pluviosidade

intensa que ocorrem por umas horas sobre bacias de pequena dimensão ou fenómenos de pluviosidade continuada que perduram por vários dias sobre bacias de maior dimensão. As cheias que ocorrem, por exemplo, nas bacias hidrográficas da região de Lisboa com áreas de cerca de 50 a 200 km<sup>2</sup> são o resultado de fenómenos de precipitação de algumas horas que dão origem a caudais específicos da ordem dos 5 a 10 m<sup>3</sup>/s/km<sup>2</sup>. Em contraste, as cheias do vale do Tejo e do Douro são o resultado de períodos mais longos de precipitação que dão origem a caudais de cheia da ordem dos 10 000 a 15 000 m<sup>3</sup>/s, o que corresponde a caudais específicos da ordem dos 0,15 m<sup>3</sup>/s/km<sup>2</sup>.

A ocorrência de situações de cheia resulta de um processo complexo, condicionado por diversos factores, de que se destaca o regime de precipitação, mas que abrange factores locais como as características fisiográficas da bacia, as características físicas e geométricas do canal fluvial e, ainda, a proximidade de zonas com influência de maré.

Na impossibilidade de estudar em pormenor todos estes factores, optou-se por focar a análise nos impactos das alterações climáticas no regime de precipitação, em particular na ocorrência de fenómenos de pluviosidade intensa. O impacto da subida expectável do nível médio do mar sobre a capacidade de vazão dos troços fluviais junto à foz e, conseqüentemente, sobre a ocorrência de situações de cheia não foi estudado.

O impacto das alterações climáticas sobre a probabilidade de fenómenos de precipitação intensa foi estimado comparando as curvas de duração da precipitação para diversos cenários climáticos. Estas curvas representam o número médio de dias com precipitação acima de determinados valores. Um aumento do número de dias com valores de precipitação intensa é um bom indicador de um aumento do risco de cheia.

## 3.4 CENÁRIOS CLIMÁTICOS

### 3.4.1 Modelos Globais e Modelos Regionais

Os modelos climáticos podem classificar-se em dois grandes grupos consoante a dimensão da área abrangida pela simulação e a resolução de cálculo utilizada: os modelos globais e os modelos regionais.

Os modelos globais (GCMs) simulam o clima à escala global, utilizando para o efeito uma rede computacional de cerca 2,50° por 3,75°, que se traduz à latitude de Portugal numa quadrícula de, aproximadamente, 300 km por 300 km. Tal resolução permite a observação de tendências climáticas regionais mas é demasiado grosseira para reflectir os efeitos

climáticos locais resultantes da orografia ou do contraste térmico entre as regiões costeiras e do interior.

Os modelos regionais (RCMs) simulam condições climáticas para regiões limitadas do globo, como por exemplo a Europa. Perturbados por condições de fronteira extraídas dos GCMs, estes modelos usam uma rede computacional de maior resolução, cerca de 0,5° por 0,5° (aproximadamente 40 km por 50 km à latitude de Portugal), permitindo assim uma simulação muito mais real do terreno e da geomorfologia do local. Contudo, esta melhoria na resolução computacional ainda não se traduziu numa franca melhoria dos resultados finais.

Dadas as exigências de capacidade de cálculo dos modelos climáticos, o número de exercícios de projecção do clima futuro devido ao aumento da concentração na atmosfera com efeito de estufa não é muito elevado. O relatório do IPCC (2001) analisa as características e as imitações da maioria dos modelos existentes, aceitando, de um modo geral, a sua capacidade destes modelos reproduzirem o clima histórico e de simular o clima futuro.

No Capítulo 1 é apresentada uma descrição mais aprofundada dos modelos climáticos.

### 3.4.2 Seleção de Modelos

Na primeira fase do Projecto SIAM foram analisados os resultados de quatro modelos climáticos globais e de dois modelos climáticos regionais (Santos *et al.*, 2002). Os resultados apresentados revelam que os modelos considerados conseguem reproduzir as principais características estatísticas das séries de precipitação e de temperatura observadas em Portugal.

As Figuras 3.15 e 3.16 apresentam a comparação entre a precipitação e a temperatura médias anuais resultantes do cenário de referência de cada modelo climático para o período de 1961 a 1990 com as respectivas médias observadas em Portugal Continental.

A temperatura média anual calculada não se afasta mais do que 2 °C em relação aos valores observados. Os resultados à escala mensal apontam igualmente para uma distribuição sazonal da temperatura média consentânea com os valores observados, apesar de alguns meses registarem desvios superiores a 2 °C entre a média observada e a simulada. No cômputo geral, os modelos HadCM3 e HadRM2 apresentam os valores mais próximos dos observados, tanto anuais como mensais.

Os resultados da precipitação apresentam uma maior dispersão em torno dos valores observados. Analisando os valo-

res simulados da precipitação anual, constata-se uma clara melhoria dos resultados do modelo HadCM3 em relação aos do modelo HadCM2. O modelo HadCM3 apresenta resultados consistentes com a média histórica, nunca se desviando mais do que 10 %. Com excepção do modelo PROMES, os restantes modelos globais tendem a subestimar os valores médios da precipitação em mais de 20 % para as regiões Norte, Centro e Sul, enquanto os dois modelos regionais sobrestimam estes mesmos valores.

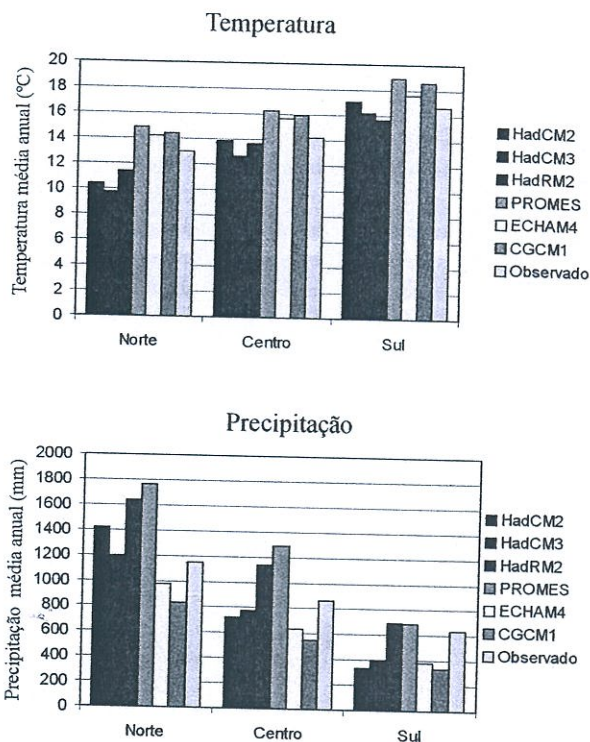


Figura 3.15 – Simulação do clima anual português pelos vários modelos climáticos

### 3.4.3 Cenários Climáticos Considerados

Em resultado das conclusões da primeira fase do Projecto SIAM, utilizaram-se para o corrente estudo os cenários de previsão do modelo climático global HadCM3 e do modelo climático regional HadRM2, ambos concebidos pelo Hadley Centre for Climate Prediction and Research.

Os resultados disponíveis das simulações produzidas por estes modelos são distintos. No que respeita ao modelo HadCM3, o Hadley Centre disponibiliza séries de valores diários para o período entre 1960-2099, o que permite estimar médias intermédias até ao final do século XXI. Estão ainda dispo-

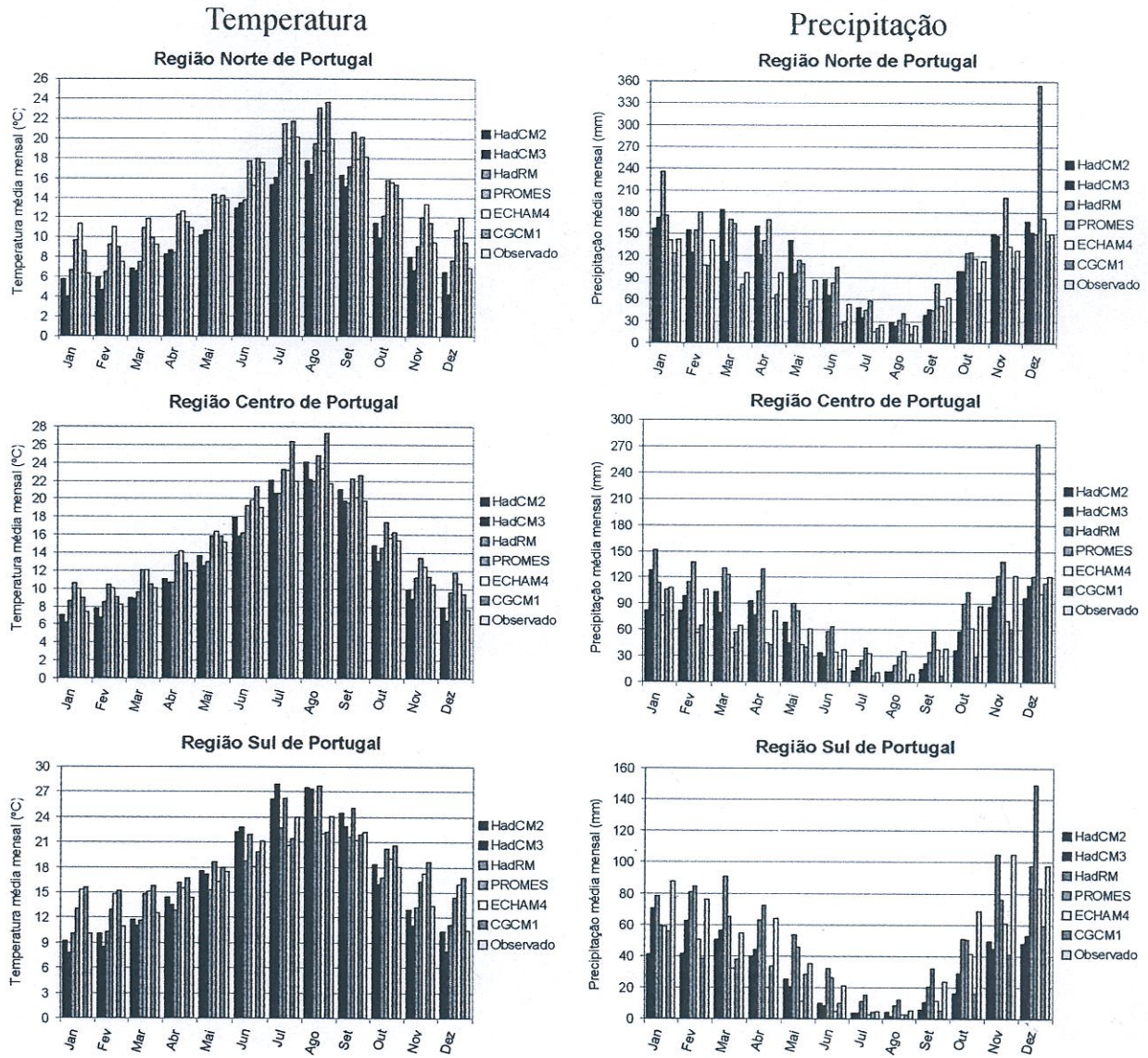


Figura 3.16 – Simulação do clima mensal português pelos vários modelos climáticos

Tabela 3.6 – Alterações médias anuais de precipitação e temperatura relativas a 1960-1994 previstas pelos modelos climáticos

Modelo / Ano	Norte		Centro		Sul	
	Prec.	Temp.	Prec.	Temp.	Prec.	Temp.
HadCM3-B2a 2050	0%	+2.1 °C	+6%	+2.7 °C	+6%	+2.3 °C
HadCM3-A2c 2050	11%	+2.5 °C	-18%	+2.8 °C	-28%	+2.6 °C
HadCM3-B2a 2100	+1.6%	+3.2 °C	+2%	+3.7 °C	-1%	+3.5 °C
HadCM3-A2c 2100	-13.6%	+4.5 °C	-28%	+5.1 °C	-42%	+4.9 °C
HadRM2 2100	-7%	+5.8 °C	-8%	+5.9 °C	-12%	+5.9 °C

níveis os resultados para diferentes cenários socioeconómicos, descritos no Capítulo 2, reflectindo-se estes na maior ou menor emissão de gases com efeito de estufa.

No caso do modelo HadRM2, estão disponíveis apenas as séries de valores diários para o período entre os anos 2080 e 2099 para um único cenário.

Para este estudo, de entre os diferentes cenários socioeconómicos considerados pelo modelo HadCM3, seleccionaram-se os cenários A2c e B2a, os quais, ao considerarem comportamentos socioeconómicos extremos permitem conhecer com alguma segurança a gama de valores dos impactos nos recursos hídricos. Os prefixos «a» e «c» dos cenários socioeconómicos referem-se a variações das alterações iniciais de simulação.

A Tabela 3.6 apresenta as alterações médias anuais relativas a 1960-1994 previstas pelos modelos climáticos considerados no presente estudo. Estes resultados prevêem um aumento generalizado da temperatura entre os 2 °C e os 6 °C e, com algumas excepções, uma manutenção ou diminuição dos valores da precipitação.

O Capítulo 2 apresenta a distribuição sazonal dos cenários previstos pelos modelos climáticos.

Para 2050, verifica-se que os cenários A2c e B2a do modelo HadCM3 estimam aumentos de temperatura semelhantes para o Norte, Centro e Sul do país, variando entre +1,4 °C no Inverno e cerca de +4,7 °C no Verão.

Quanto à evolução da precipitação, os cenários para 2050 apresentam estimativas distintas, verificando-se a maior discrepância de valores nos meses de Inverno. O cenário A2c prevê a manutenção dos valores de precipitação de Inverno no Norte e uma diminuição de 25 % de precipitação no Sul. Em contraste, o cenário B2a estima um aumento da precipitação para todo o país, que pode atingir valores entre os 10 % e os 18 %. Para os meses de Outono, o cenário A2c prevê uma redução da precipitação entre 12 % e 33 %, contrastando, uma vez mais, com o cenário B2a que admite um aumento da precipitação entre 1 %, no Norte, e os 9%, no Sul. Nas restantes estações, ambos os cenários apontam para uma redução da precipitação em todo o país, variando entre os 12 % e os 25 % do valor da precipitação na Primavera e, aproximadamente, 25 % de precipitação no Verão.

Os cenários para 2100 do modelo HadCM3 e do modelo HadRM2 prevêem subidas da temperatura em todo o país e em todas as estações do ano. Para os meses do Outono e Primavera os modelos admitem uma subida entre 2 °C

e 4 °C e entre 4 °C e 6 °C, respectivamente. As previsões para os meses de Inverno variam entre 2 °C e 4 °C, para as regiões Norte e Centro, e entre 2,5 °C e 5 °C, para o Sul, correspondendo este último valor ao modelo HadRM2. No Verão é prevista a maior variação da temperatura que pode atingir 8,4 °C para a região Centro, de acordo com o cenário HadCM3-A2c. Para as regiões Norte e Sul, os cenários do Verão estimam ainda um aumento entre 4,5 °C e 7 °C.

No que respeita aos cenários de precipitação para 2100, constata-se que o modelo HadRM2 se demarca pela grande variabilidade das estimativas para as diferentes estações do ano e regiões do país. Este modelo admite uma subida de 50 % da precipitação no Inverno e uma redução de 75 % no Verão. No mesmo sentido, mas menos pronunciada, é a estimativa do modelo HadCM3 para o cenário B2a: um aumento da precipitação entre 18 % e 25 % no Inverno e uma forte diminuição da precipitação nos meses de Verão (entre 40 % e 50 %). O cenário HadCM3-A2c admite um aumento da precipitação no Inverno de 4 %, no Norte, uma diminuição de 34 %, no Sul. O mesmo cenário prevê ainda uma diminuição generalizada no Verão, entre 40 % e 50 %.

Em síntese, os cenários apresentados apontam para um aumento dos valores de temperatura em todo o país durante todo o ano, mas sobretudo no Verão. As tendências da precipitação não são tão explícitas. Para o Inverno, há algumas dúvidas quanto à magnitude e direcção das alterações nos meses de Inverno e Outono, mas todos os modelos apontam para uma redução da precipitação média mensal nos meses da Primavera e Verão.

### 3.5 IMPACTOS DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS NOS RECURSOS HÍDRICOS

#### 3.5.1 Disponibilidade de Água

##### 3.5.1.1 Recursos Hídricos Superficiais

Uma diminuição da precipitação acompanhada por um aumento da evapotranspiração potencial, relacionada com o aumento da temperatura, tenderá a provocar uma diminuição das disponibilidades anuais de água (Figuras 3.17 e 3.18). As variações sazonais das alterações da temperatura e precipitação podem, no entanto, não confirmar esta tendência (Figuras 3.19 e 3.20).

Os resultados dos modelos não apresentam uma tendência clara do escoamento anual, muito embora todos admitam

uma significativa alteração da sua distribuição sazonal. A indefinição quanto à tendência do escoamento anual resulta da disparidade dos cenários de escoamento para os meses de Inverno e Outono a qual, por sua vez, é consequência da variedade dos cenários de precipitação. No entanto, todos os modelos apontam para uma redução do escoamento nas restantes estações do ano.

O cenário mais pessimista é o HadCM3-A2c que prevê uma redução do escoamento médio anual para 2050 entre os 10 %, a norte do Douro, e os 50 % na região do Algarve. Esta tendência acentua-se em 2100, admitindo-se que a redução

do escoamento anual médio possa atingir 80 % no Algarve. Os restantes cenários prevêem um aumento do escoamento anual médio que pode atingir em 2100 os 20 %, de acordo com o cenário HadCM3-B2a, ou os 40 %, de acordo com o cenário HadRM2.

Entre a grande variedade de cenários dos impactos das alterações climáticas sobre o escoamento há certos padrões que sobressaem. A esmagadora maioria dos cenários prevê uma tendência de redução do escoamento na Primavera, Verão e Outono. É também patente que a magnitude dos impactos aumenta de norte para sul. Com efeito, todos os cenários, independentemente de preverem um aumento ou diminuição do escoamento, sugerem que essa variação aumenta, em termos relativos, do Norte para o Sul do país. Outra constatação é que a magnitude das estimativas de aumento é menor que a magnitude das estimativas de redução. As primeiras atingem no máximo os 40 %, enquanto as segundas podem atingir os 80 %.

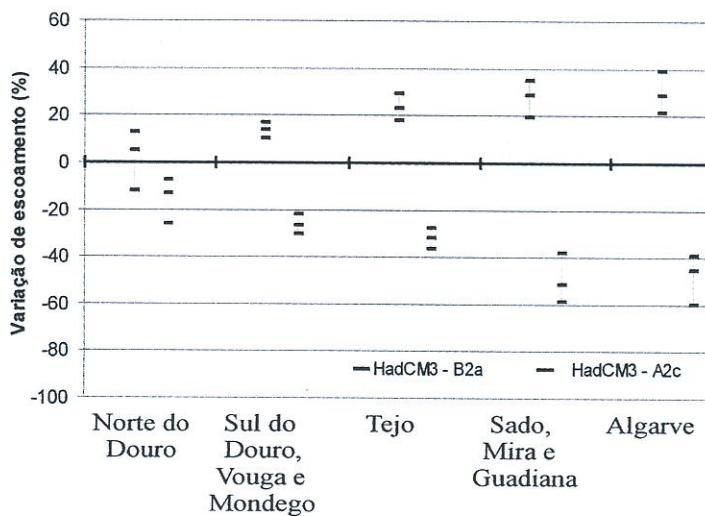


Figura 3.17 – Variação do escoamento anual médio para o horizonte de 2050

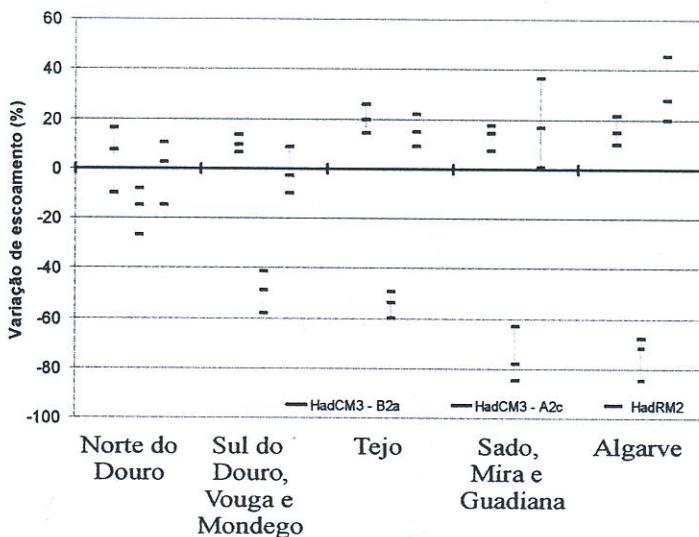


Figura 3.18 – Variação do escoamento médio anual para o horizonte de 2100

A existência de grandes bacias hidrográficas partilhadas por Portugal e Espanha implica que as alterações climáticas em Espanha também afectam o regime de escoamento em Portugal. A Figura 3.21 apresenta os cenários climáticos correspondentes ao modelo HadCM3 para Espanha e a Figura 3.22 compara os cenários correspondentes ao modelo HadRM2 para ambos os países. Verifica-se que as alterações de temperatura e de precipitação previstas para os dois lados da fronteira são muito semelhantes. O decréscimo previsto de precipitação conduzirá à redução do escoamento esperado em ambos os lados da fronteira, o que virá acentuar ainda mais o decréscimo de disponibilidade de água esperado em Portugal nos rios transfronteiriços.

### 3.5.1.2 Recarga

Parece inquestionável que um dos principais efeitos esperados dos cenários de alteração climática nas águas subterrâneas é o de alteração das taxas de recarga nos aquíferos (IPCC 2001).

Estudos já realizados confirmam esse facto: Sandstrom (1995) mostrou que uma redução de 15 % na pluviosimetria, sem alteração na temperatura, corresponderia a um decréscimo de 40 a 50 % no parâmetro de recarga. Efeitos similares foram previstos por: Ghassemi *et al.* (1991) em diferentes aquíferos da Austrália; Vaccaro (1992) que usou

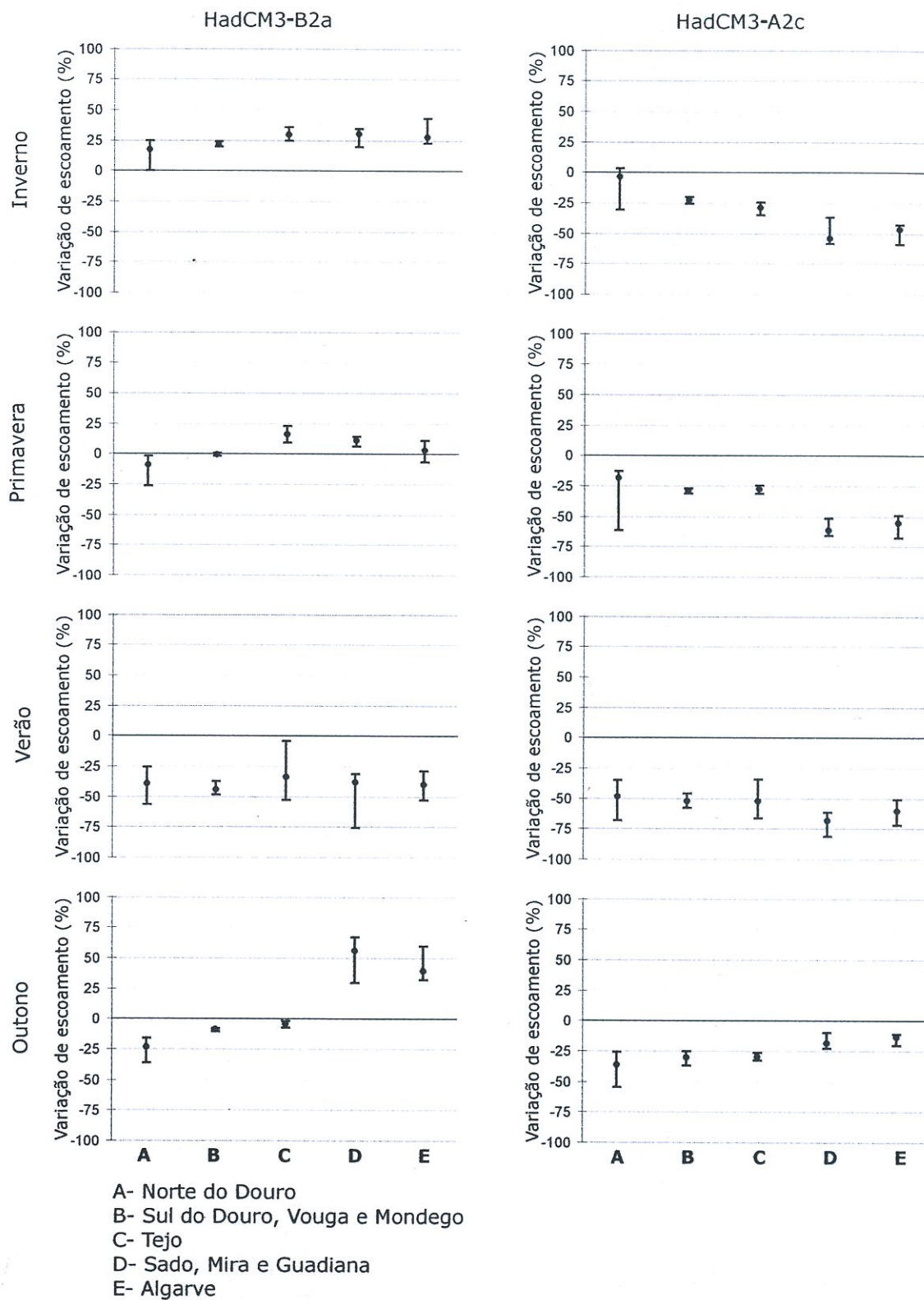


Figura 3.19 – Variação do escoamento médio sazonal para o horizonte de 2050

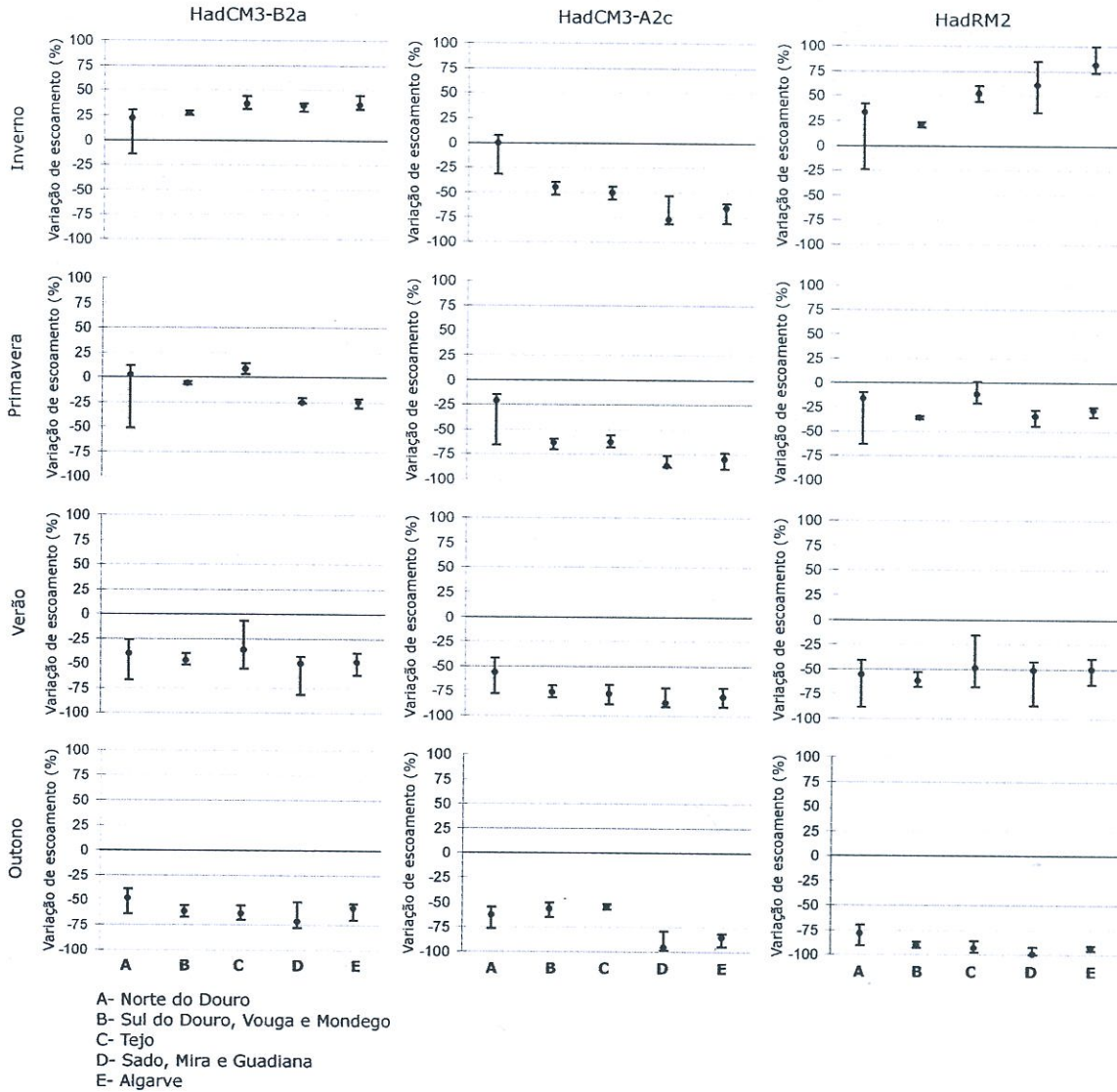


Figura 3.20 – Variação do escoamento médio sazonal para o horizonte de 2100

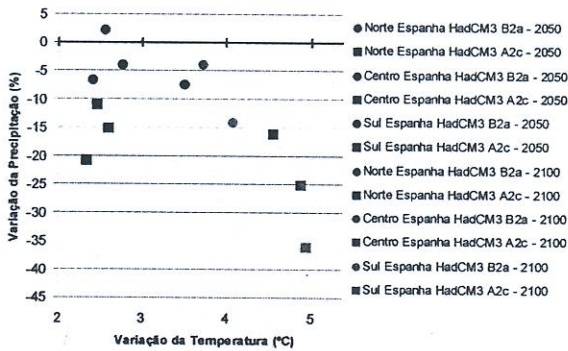


Figura 3.21 – Alterações médias anuais previstas pelo modelo HadCM3 para Espanha (referência: 1960-1994)

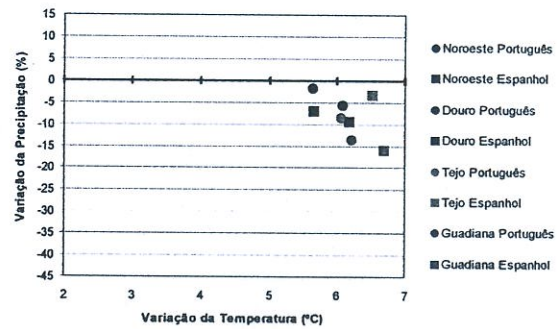


Figura 3.22 – Alterações médias anuais previstas pelo modelo HadRM2 para Espanha e Portugal (referência: 1960-1994)

um modelo de recarga numa base diária para prever variações numa bacia semiárida em Washington, EUA; Hewett *et al.* (1993) que estudou o efeito de vários cenários climáticos no comportamento de um aquífero carbonatado situado em Kent, Inglaterra, e Cooper *et al.* (1995) que calculou a recarga num aquífero com características litológicas similares mas localizado no Sul da Inglaterra, mostrando que num cenário de aumento de 8 % de valores de pluviometria no Inverno, a alteração de recarga depende da variação assumida da evaporação e, consequentemente, da duração dos períodos de recarga. Já Bouraoui *et al.* (1999) previram, reduções substanciais na recarga de um aquífero localizado perto de Grenoble, França, quase na totalidade, devido ao aumento das taxas de evaporação.

No projecto GRACE (Groundwater Resources and Climate Change Effects), financiado pela CE no contexto do 3.º Programa-Quadro (Ambiente e Clima) analisaram-se as respostas de alguns aquíferos carbonatados europeus, localizados em ambientes geográficos climáticos distintos, às modificações da recarga causadas pelos potenciais impactos das futuras alterações climáticas. Os resultados obtidos mostraram:

- que um aumento da precipitação terá um forte impacto na recarga e na descarga por nascentes na zona marítima;
- que esse aumento far-se-á já sentir de modo distinto nas áreas localizadas em clima continental, nas diferentes épocas do ano; a recarga no período de Inverno não sofrerá praticamente alterações enquanto no Verão se reduzirá dramaticamente;
- que nos aquíferos situados na zona mediterrânica, são previsíveis decréscimos na recarga (aprox. 16 %) associados a uma exacerbada variabilidade interanual (Younger *et al.*, 2002).

De entre as principais conclusões do Projecto SIAM I (Santos *et al.*, 2002; Cunha *et al.*, 2002a) estão: a) uma progressiva redução da precipitação anual; b) uma maior redução da precipitação no Sul de Portugal aumentando a assimetria de disponibilidades hídricas; c) uma maior concentração da precipitação nos meses de Inverno. Estes cenários em conjunto com o aumento das taxas de evaporação (causado pelo aumento previsível da temperatura) irão provocar, segundo a maioria dos cenários climáticos, uma diminuição da recarga efectiva dos aquíferos, com consequências directas na piezometria dos sistemas.

No presente estudo faz-se uma primeira abordagem do impacto das alterações climáticas na recarga através dos resultados do modelo de Temez. Apesar deste modelo não ser vocacionado para o cálculo da recarga, consideraram-se os seus valores após ter sido feita uma calibração que teve em conta a infiltração das bacias modeladas.

Comparando os valores de recarga actuais com os previstos pelos modelos, verifica-se, no caso das médias anuais (Figuras 3.23 e 3.24), que as previsões do cenário B2a do modelo HadCM3 admitem uma subida dos valores no Sul de Portugal até ao ano 2050. Em contraste, o cenário A2c do mesmo modelo indicia uma forte descida da recarga neste período, variando entre cerca de 10 % a norte do Douro e 45 % nas bacias a sul do Tejo.

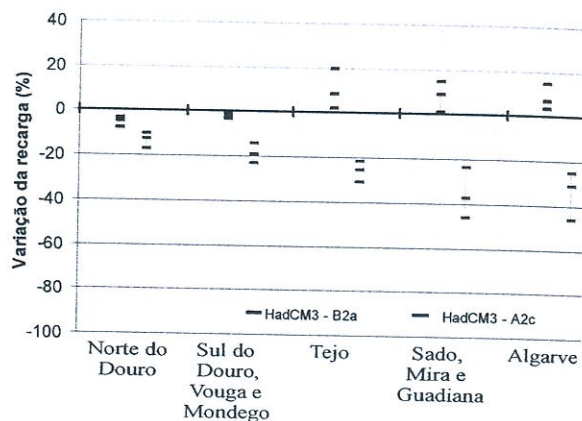


Figura 3.23 – Variação da recarga média anual para o horizonte de 2050

Ao considerar-se os resultados referentes à média anual da recarga para 2100, os resultados são mais pessimistas. O cenário mais favorável (B2a) do modelo HadCM3 deixa de prever subidas em todas as bacias do Sul de Portugal, apresentando uma gama de valores que variam entre os -5 % e os +17 % para a bacia do Tejo e uma descida até 10 % nas restantes bacias. O cenário A2c continua a prever uma descida acentuada das recargas para as bacias estudadas. As previsões climatológicas deste cenário poderão levar a uma des-

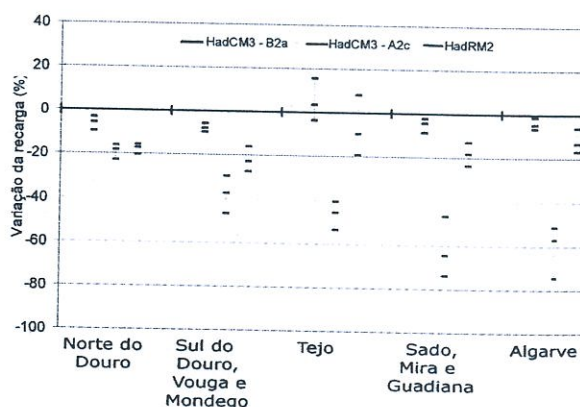


Figura 3.24 – Variação da recarga média anual para o horizonte de 2100

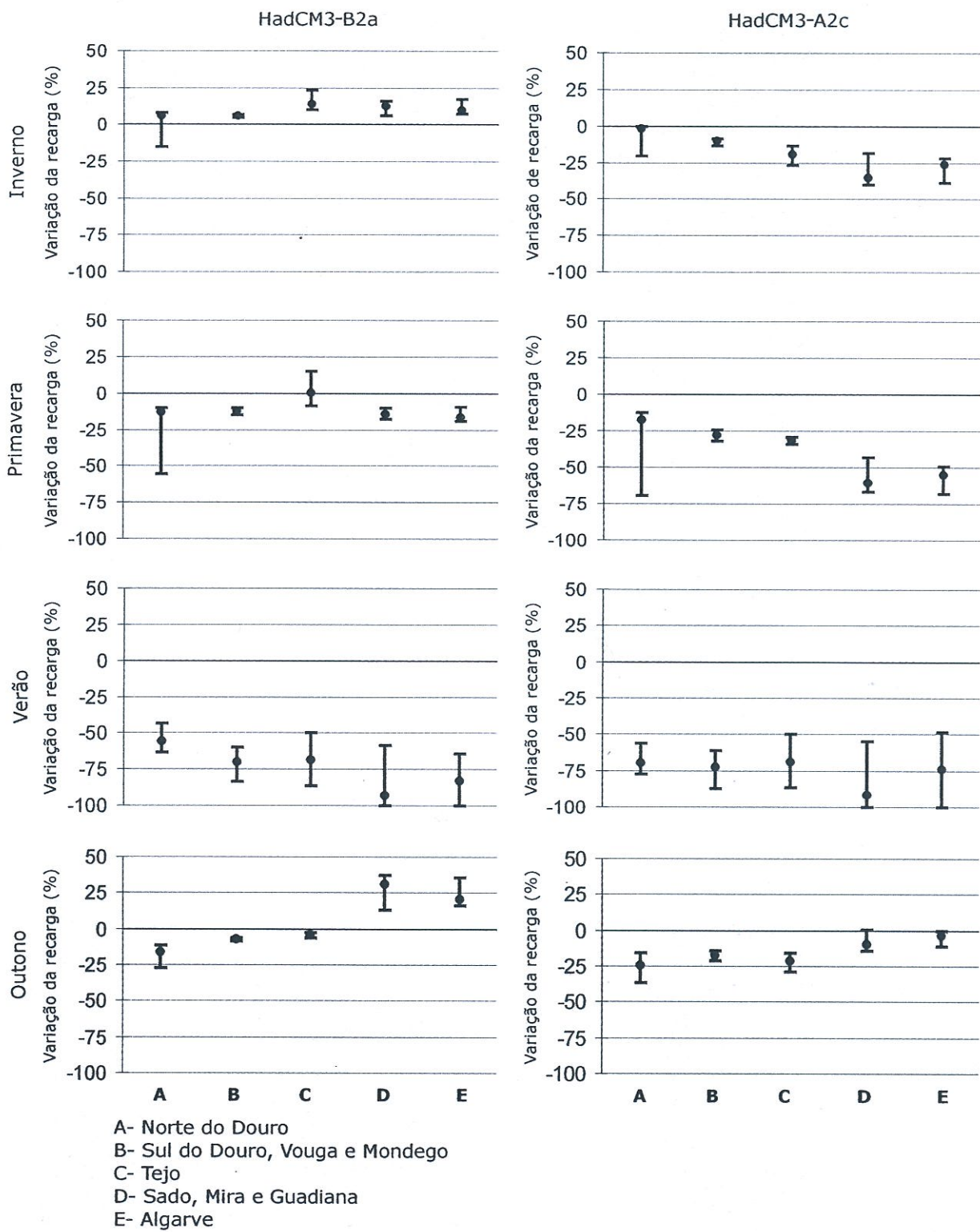


Figura 3.25 – Variação da recarga média sazonal para o horizonte de 2050

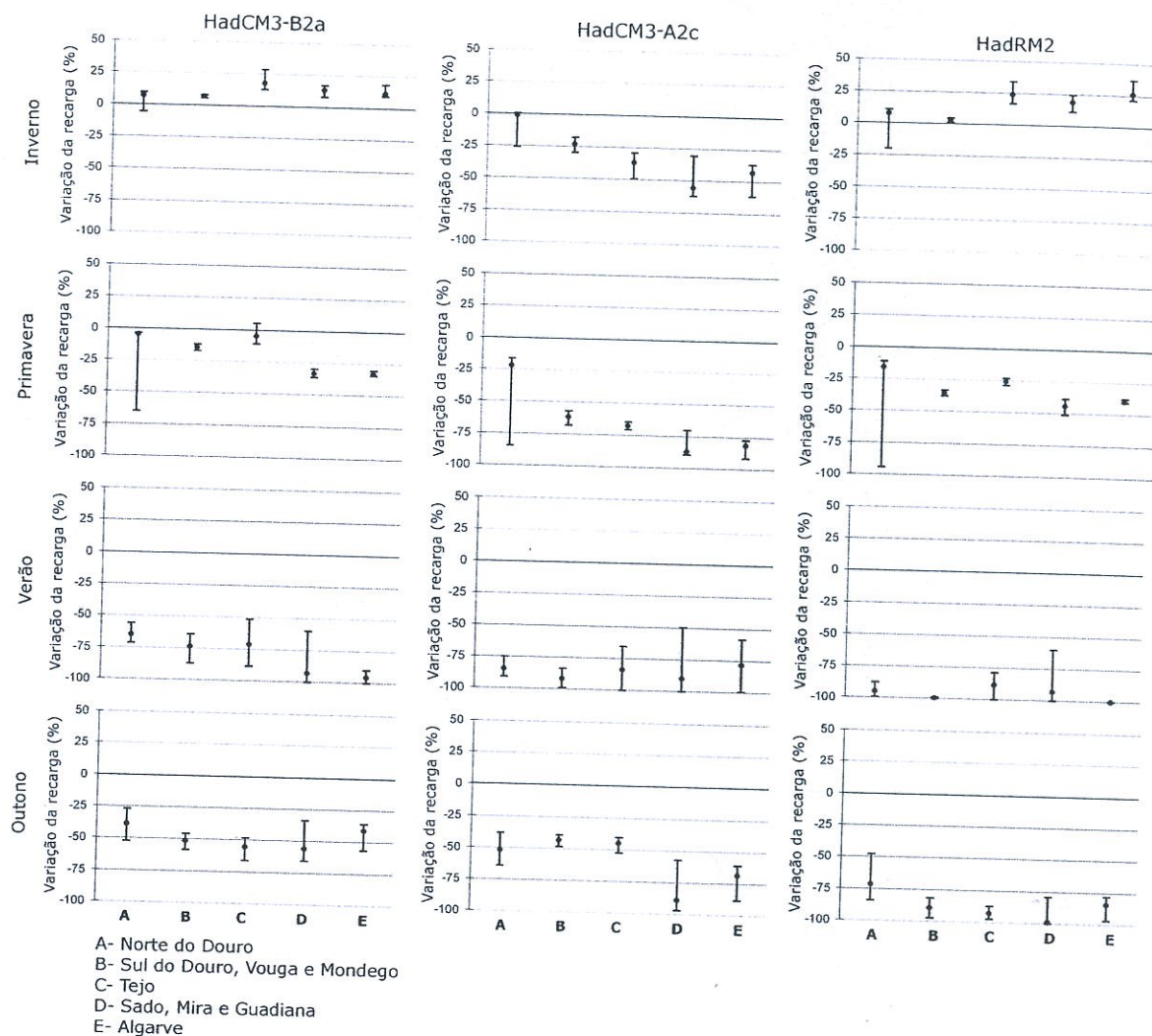


Figura 3.26 – Variação da recarga média sazonal para o horizonte de 2100

cida até 75 % nas bacias do Sado, Mira, Guadiana e bacias do Algarve. Nas restantes bacias a tendência é também de descida variando entre 20 % na região Norte do Douro e 50 % na bacia do Tejo.

O modelo HadRM2, embora menos pessimista que o cenário A2c, considera uma descida aproximada de 20 % para as diferentes regiões, à excepção da bacia do Tejo, para a qual prevê entre uma subida de 10 % e uma descida de 20 % da recarga.

No caso das variações sazonais (Figuras 3.25 e 3.26), verifica-se que é no Verão e na Primavera que ocorre uma maior redução no valor da recarga. Contudo, em termos absolutos, esta descida não tem a mesma importância de uma descida dos valores nas estações do Outono ou Inverno, pois é neste

período que os aquíferos retomam os níveis piezométricos. Ao analisar-se as variações da recarga neste período verifica-se mais uma vez uma diferença significativa entre os resultados correspondentes aos dois cenários socioeconómicos do modelo HadCM3 que foram analisados.

No caso do cenário B2a, este prevê até 2050 uma subida dos valores nos meses de Inverno, sobretudo nas bacias a sul do rio Douro. Já o cenário A2c prevê uma descida generalizada da recarga para todas as estações em todas as bacias consideradas.

No que se refere a 2100, o cenário B2a apenas considera uma subida da recarga no Inverno, considerando para o Outono descidas superiores a 30 %, o que se irá reflectir numa acenuação da variabilidade temporal da recarga. Para o mesmo

horizonte, o cenário A2c é novamente o mais pessimista ao considerar uma eventual ausência de recarga para o Verão. Para as restantes estações do ano, este cenário considera também descidas bastante acentuadas, as quais, à excepção da região Norte do Douro, nunca são inferiores a 20 % no Inverno e 40 % no Outono e Primavera.

O modelo HadRM2 é aquele que prevê um maior acréscimo da variabilidade temporal da recarga. Este modelo aceita uma ausência da recarga nos meses de Verão e em algumas regiões no Outono, no entanto, no Inverno prevê subidas até 40 % do valor da recarga na região do Algarve.

### 3.5.2 Piezometria

#### 3.5.2.1 Introdução

Parece igualmente evidente que por força das alterações da magnitude e dos padrões de recarga efectiva dos aquíferos haverá lugar a uma modificação na posição da superfície piezométrica. Todos os estudos apontam para que isso aconteça com especial incidência nos aquíferos livres.

Por exemplo, Loaiciga *et al.* (2000) estudaram o efeito de vários cenários de alteração climática nos níveis freáticos de um aquífero localizado no Texas, EUA, com grandes taxas de exploração e alimentado por um rio. Aqueles autores mostraram que em seis dos sete cenários GCM, haveria lugar a uma redução significativa dos níveis piezométricos e

dos caudais de nascente devido a uma diminuição do caudal do rio. Por sua vez, Wilkisson e Cooper (1992) ao aplicarem um modelo de interface rio/aquífero previram que as variações de recarga influiriam nos níveis piezométricos do aquífero vindo indirectamente a afectar o caudal de base do rio.

#### 3.5.2.2 Perspectiva Nacional

Tendo em conta a disponibilidade de séries piezométricas nos sistemas aquíferos de Portugal, monitorizadas durante um período de tempo estatisticamente significativo, é possível avaliar a tendência de evolução da piezometria em dezasseis sistemas aquíferos da Orla Meridional, dez da Orla Ocidental e dois da bacia do Tejo-Sado e duas formações hidrogeológicas indiferenciadas do Maciço Antigo.

As séries analisadas correspondem a períodos de monitorização distintos. Refira-se que, em alguns casos, essas estações, pelo seu número reduzido e pela sua distribuição espacial, podem não ser representativas do estado piezométrico do sistema. Regra geral o período estende-se desde os meados da década de 1970 até meados do ano 2000. Exceptuam-se as séries piezométricas da bacia do Tejo e do Sado que cobrem unicamente um período até meados dos anos 1990.

Seguidamente apresentam-se alguns resultados para a Orla Meridional e a Orla Ocidental.

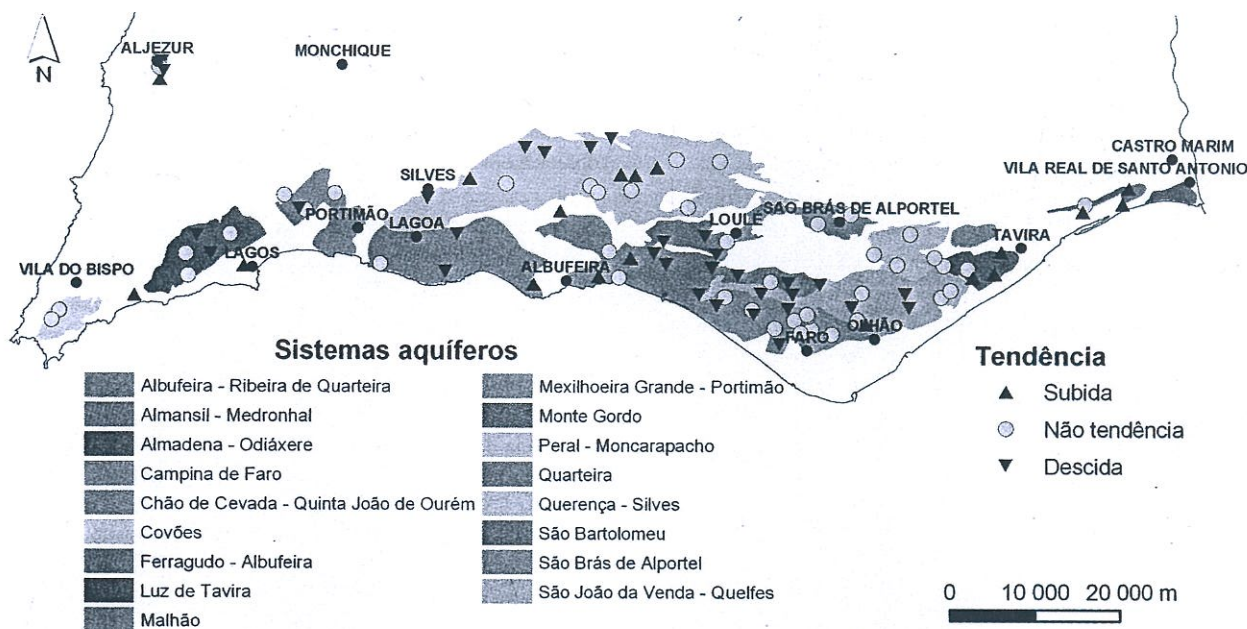


Figura 3.27 – Sentido das tendências dos níveis piezométricos nos sistemas aquíferos da Orla Meridional

### Orla Meridional

Registaram-se no período em análise tendências significativas de descida de níveis piezométricos na maior parte dos pontos dos sistemas aquíferos Almadena-Odiáxere, Mexilhoeira Grande-Portimão, Ferragudo-Albufeira, Albufeira-Ribeira da Quarteira, Campina de Faro, São Bartolomeu e Monte Gordo (Figura 3.27).

A localização destas estações de monitorização, perto da costa algarvia, associada aos problemas de salinização causados pela intrusão marinha aí detectados, leva-nos a concluir que aqueles sistemas se encontravam numa situação de sobreexploração no período em análise, consequência da utilização intensiva dos seus recursos hídricos.

Pelo contrário, em outros sistemas, como no aquífero de Querença-Silves, tendo em conta as suas especificidades, registaram-se tendências diversas de comportamento, reveladoras de que o sistema se encontra em equilíbrio entre entradas e saídas, considerando os fenómenos climáticos extremos (períodos de seca) e as solicitações externas (bombagens). Numa situação análoga está o aquífero da Luz de Tavira (maioria de subidas nas tendências detectadas), e o sistema de Almansil-Medronhal (nenhuma tendência significativa detectada).

Nesta unidade hidrogeológica foi seleccionado como caso de estudo o sistema aquífero de Querença-Silves, de características cársicas.

### Orla Ocidental

Do reduzido número de sistemas aquíferos estudados para os quais existe informação piezométrica com representatividade espaciotemporal relevante, pode concluir-se o seguinte:

O sistema aquífero cretácico de Aveiro é o único onde se registou um número significativo de tendências de sinal negativo (90 %) para o período que decorreu entre Janeiro de 1981 e Dezembro de 1998. As descidas do nível piezométrico oscilaram entre os 0,5 cm/mês e os 7,2 cm/mês, fruto das bombagens intensivas que ocorreram nesse período. Esta situação associada ao facto de haver indícios de intrusão salina localizada leva-nos a concluir que o aquífero se encontrava em situação de sobreexploração. Uma situação idêntica foi detectada no mesmo período para o sistema aquífero do Liásico a norte do Mondego (50 % de tendências negativas).

Nos outros sistemas analisados observou-se em geral uma subida generalizada de níveis como é o caso do sistema Leirosa-Monte Real (67 % de tendências de sinal positivo).

O subsistema quaternário de Aveiro revelou por sua vez no período em análise, tendências diferentes conforme os sectores monitorizados, com o predomínio de uma situação de equilíbrio (cerca de 50 % das séries piezométricas não revelaram tendência).

Nesta unidade hidrogeológica foi seleccionado como caso de estudo o sistema aquífero quaternário de Aveiro, de características porosas.

#### 3.5.2.3 Caso de Estudo: Sistema Aquífero Quaternário de Aveiro

##### Breve Descrição Hidrogeológica

Este sistema situa-se na Orla Hidrogeológica Ocidental e é constituído por uma unidade aquífera superficial, livre, formada por areias de duna e praia e por outra unidade inferior, semiconfinada, cujo suporte são as cascalheiras de base do Quaternário (Ribeiro *et al.*, 1999). A recarga faz-se sobretudo pela precipitação, pelo que o aquífero responde rapidamente, com uma acentuada subida dos níveis após as primeiras precipitações. A variação média anual da piezometria entre a época seca e a época húmida é da ordem dos 1,20 m (*ibidem*). A descarga faz-se de um modo geral para o mar, podendo também ocorrer para os sistemas aquíferos subjacentes – subsistema cretácico de Aveiro e sistema liásico a norte do Mondego.

##### Análise de Tendências

A rede piezométrica é constituída por 37 piezómetros irregularmente distribuídos pelo sistema. A periodicidade das observações é na sua generalidade mensal.

Na Figura 3.29 apresentam-se os resultados da análise de tendências da piezometria do sistema quaternário de Aveiro, medida entre Janeiro de 1981 e Dezembro de 1998 (Ribeiro *et al.*, 1999).

Em termos globais verifica-se que cerca de 49 % dos piezómetros apresentam uma tendência de descida, 16 % uma tendência de subida e 35 % dos piezómetros não manifestam qualquer tendência significativa.

Os piezómetros que revelam uma tendência significativa de descida do nível da água concentram-se na zona norte do subsistema aquífero. O valor do declive de descida mais significativo do nível da água foi registado no piezómetro Q1, que foi da ordem de 1 cm/mês.

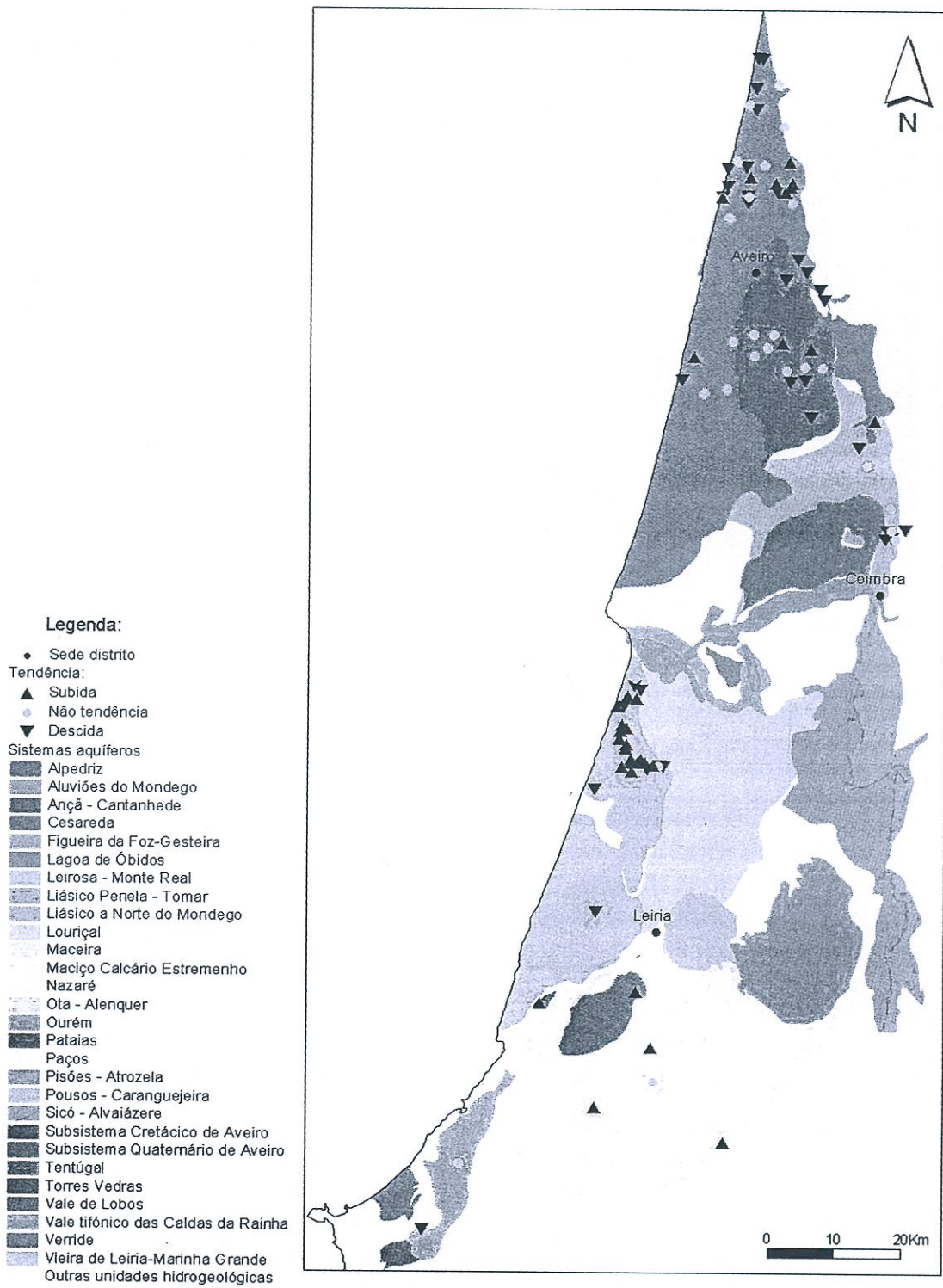


Figura 3.28 – Sentido de tendências dos níveis piezométricos nos sistemas aquíferos da Orla Ocidental

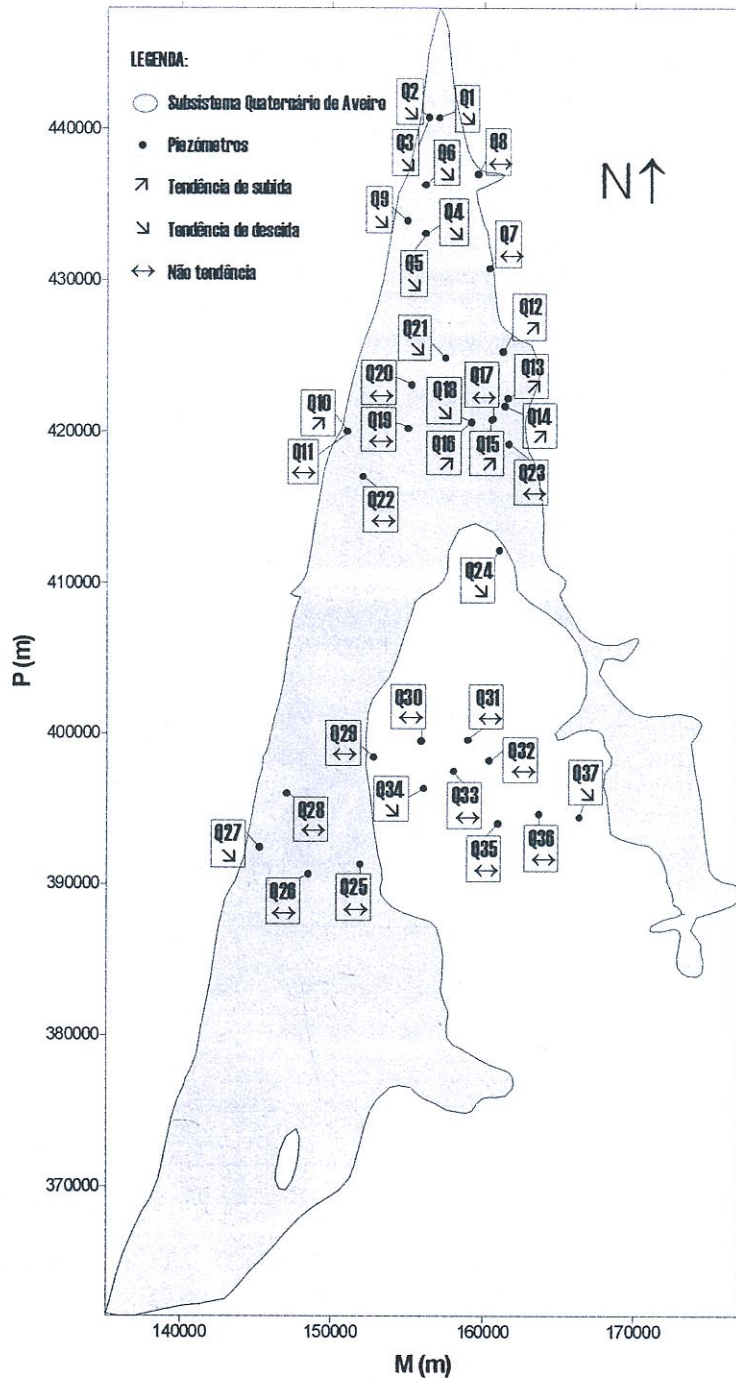


Figura 3.29 – Rede piezométrica do sistema aquífero do quaternário de Aveiro e tendências de evolução piezométrica no período de Janeiro de 1981 a Dezembro de 1997

Os piezómetros onde foi detectada uma tendência significativa de subida localizam-se sensivelmente na zona central, enquanto os piezómetros onde não se verificam tendências dos níveis de água distribuem-se na zona sul do subsistema aquífero. A subida mais significativa foi registada no piezó-

metro Q13 com um valor de declive da ordem de 1,9 cm/mês.

### Impacto na Piezometria

Como se pode ver pela Figura 3.30, os valores de rebaixamento previstos para a superfície piezométrica deste sistema aquífero acompanham as variações de precipitação dadas por cada um dos modelos. Deste modo, o cenário mais pessimista corresponde ao cenário socioeconómico A2c do modelo climático HadCM3 que prevê para 2100 rebaixamentos no nível freático até 6 m, sucedendo o oposto com o cenário B2a3. De facto no que respeita a este último, as simulações realizadas apontam para uma pequena subida dos níveis hidrostáticos quando se transformam as previsões futuras de precipitação em tendências de piezometria.

O cenário HadRM2 prevê por seu lado uma evolução intermédia que se situa entre os cenários anteriores, com uma variação dos níveis entre os -0,5 m e -1,7 m.

#### 3.5.2.4 Caso de Estudo: Sistema Aquífero de Querença-Silves

##### Breve Descrição Hidrogeológica

O sistema aquífero de Querença-Silves insere-se na Unidade Hidrogeológica da Orla Meridional sendo considerado pela sua extensão e produtividade o sistema aquífero mais importante no Algarve. Com uma área de 318 km<sup>2</sup>, este aquífero cársico é constituído por calcários do Jurássico, podendo coexistir sectores com comportamentos hidrogeológicos distintos.

A fracção de precipitação que se infiltra no aquífero situa-se perto dos 40 % e os valores de transmissividade (indicador da mobilidade da água no aquífero) variam entre os 1200 e 3000 m<sup>2</sup>/dia. A produtividade média das captações em exploração é da ordem dos 11 l/s. O fluxo subterrâneo dá-se principalmente para oeste, podendo coexistir fluxos com direcções N-S e E-W. Calculando o balanço hídrico concluímos que o sistema se encontra em situação de subex-

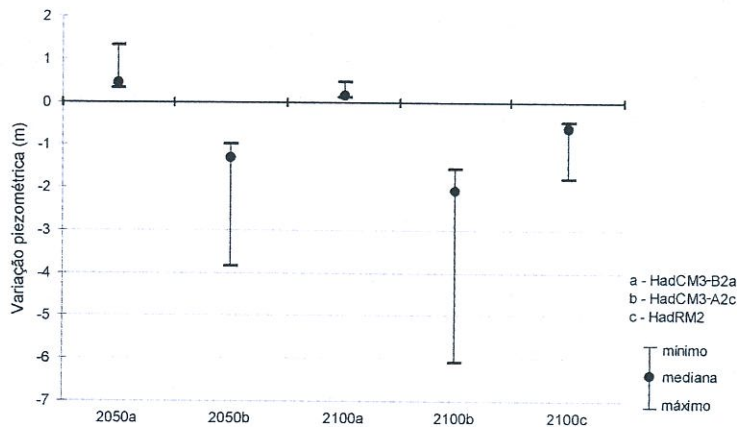


Figura 3.30 – Rebaixamentos piezométricos previstos para os anos 2050 e 2100 no sistema aquífero quaternário de Aveiro

ploração, estimando-se as entradas em 70 hm<sup>3</sup>/ano e as saídas em 45hm<sup>3</sup>/ano (INAG, 1997).

**Análise de Tendências**

A Figura 3.31 apresenta os resultados da aplicação da análise de tendências aos níveis piezométricos do sistema aquífero de Querença-Silves, medidos nos pontos cuja série temporal se iniciou em Julho de 1982.

Pela figura pode-se concluir que os pontos com tendências semelhantes se encontram agrupados em sectores do aquífero. Os piezómetros cujas séries apresentam tendência de descida situam-se no sector mais a norte deste aquífero, variando as amplitudes de mudança entre os 0,9 e os 5 cm/mês. No sector

oeste do aquífero surge também um piezómetro com tendência de descida dos níveis. No entanto, a amplitude de descida é menor que nos localizados no sector norte.

Nas zonas sul e sudeste do aquífero, a tendência dos níveis piezométricos alternou entre a estabilização e a tendência de subida dos níveis. Nestes últimos, a amplitude de subida varia entre os 2,5 e o 8,5 cm mensais.

**Impacto na Piezometria**

Em termos gerais podemos concluir que o potencial do sistema aquífero de Querença-Silves revelou uma maior sensibilidade às variações climáticas. Em geral a resposta piezométrica deste sistema é sempre superior à do aquífero quaternário de Aveiro para cenários semelhantes de variação de precipitação. A este facto não deverão ser estranhas as suas características litológicas do tipo cársico.

Para além das diferenças de funcionamento hidráulico que ocorrem entre esses aquíferos, contribuem igualmente, para as diferenças detectadas entre os rebaixamentos observados, as desigualdades previstas para as projecções futuras de precipitação em cada uma das áreas geográficas.

Como mostra a Figura 3.32, tendo em conta o cenário A2c, os níveis piezométricos do aquífero de Querença-Silves poderão ter descidas da ordem dos 8 m até ao ano 2050 e 13 m até ao ano 2100. Já o cenário B2a considera uma variação menos, no entanto, prevê uma mudança de sinal entre



Figura 3.31 – Sentido das tendências de evolução dos níveis piezométricos do sistema aquífero Querença-Silves no período de Julho de 1982 a Setembro de 2001 (valores de declive em m)

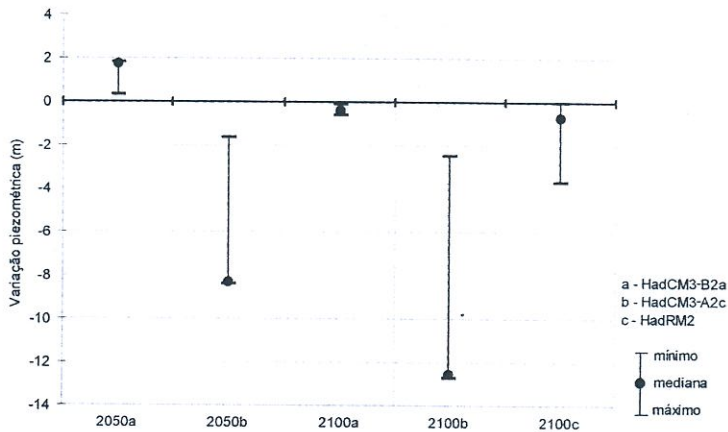


Figura 3.32 – Rebaixamentos piezométricos previstos para os anos 2050 e 2100 no sistema aquífero Querença-Silves

o horizonte de 2050 e 2100. O modelo regional HadRM2 estima entre 0 e -4 m a variação dos níveis até ao ano 2100.

### 3.5.3 Interação entre Sistemas Hídricos Superficiais e Subterrâneos

#### 3.5.3.1 Sistemas Fluviais Interiores

##### Caso de Estudo: Ribeira de Enxoé

A água subterrânea desempenha um importante, embora muito subvalorizado, papel no funcionamento dos ecossistemas aquáticos. Com efeito os sistemas hidrogeológicos fornecem em geral um caudal de base que é vital para a preservação da flora e da fauna de muitos ecossistemas fluviais em regiões semiáridas, principalmente durante os meses de Verão.

Por sua vez o ambiente geológico condiciona significativamente o funcionamento hidráulico entre os sistemas superficial e subterrâneo. Por exemplo, os aquíferos poro-

sos aluvionares, caracterizados por elevados valores de coeficiente de armazenamento e de transmissividade, e formações hidrogeológicas fissuradas, em que o factor armazenamento é reduzido e a circulação se processa por caminhos preferenciais, terão como é óbvio comportamentos muito distintos.

Foi seleccionado para caso de estudo um troço da ribeira de Enxoé, a jusante da barragem do mesmo nome. Esta ribeira, que se localiza na bacia hidrográfica do rio Guadiana, atravessa diversas formações geológicas (gabros, pórfiros, calcários, gabrodioritos). Do ponto de vista hidrogeológico a zona é caracterizada por uma grande escassez de recursos hídricos subterrâneos, embora a água subterrânea extraída de poços seja utilizada em pequenas explorações agrícolas, pecuárias ou para abastecimento domiciliário.

Dada a natureza das formações, o armazenamento de água nestes sistemas é em geral muito reduzido, processando-se o escoamento subterrâneo fundamentalmente por fracturas ou por outros acidentes estruturais. A água pode armazenar-se em pequenas formações aluvionares. Apesar de pobres, estes sistemas hidrogeológicos comportam-se de uma forma distinta de local para local, do ponto de vista de difusividade dos fluxos, e têm consequentemente contribuições diferentes para a preservação dos ecossistemas aquáticos.

Um estudo de interpretação fotogeológica da área permitiu identificar zonas preferenciais de alimentação da ribeira. As principais conclusões deste relatório são as seguintes:

1. As principais emergências do sistema hidrogeológico estão associadas à presença de falhas e à diversidade litológica;
2. As rochas com maior permeabilidade por fissuração e armazenamento são os gabrodioritos;

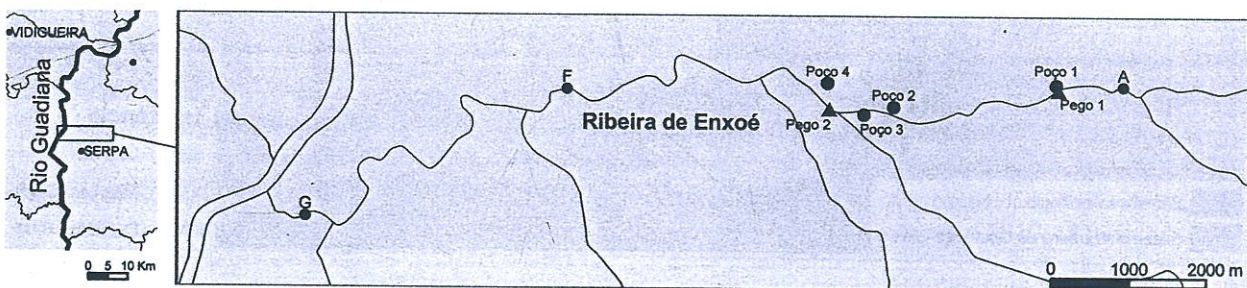


Figura 3.33 – Ribeira de Enxoé: localização dos pegos e dos poços



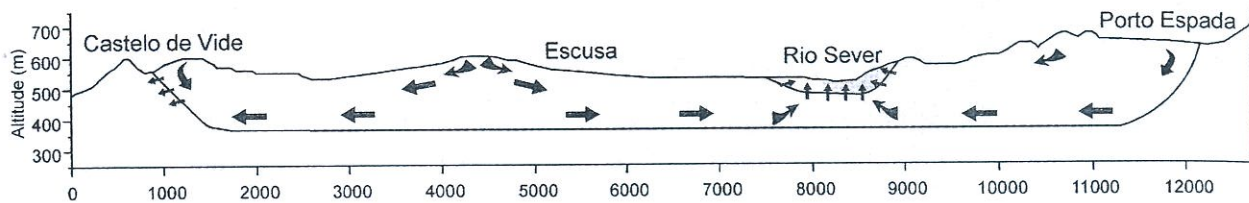


Figura 3.36 – Modelo conceptual do fluxo subterrâneo no aquífero de Escusa

rochas carbonatadas devónicas, de acordo com o estado actual do conhecimento acerca da geologia desta área. Esta figura consiste numa representação gráfica da rede em elementos finitos, construída para simular o modelo conceptual de funcionamento hidráulico do aquífero de Escusa, representado de forma esquemática na Figura 3.36.

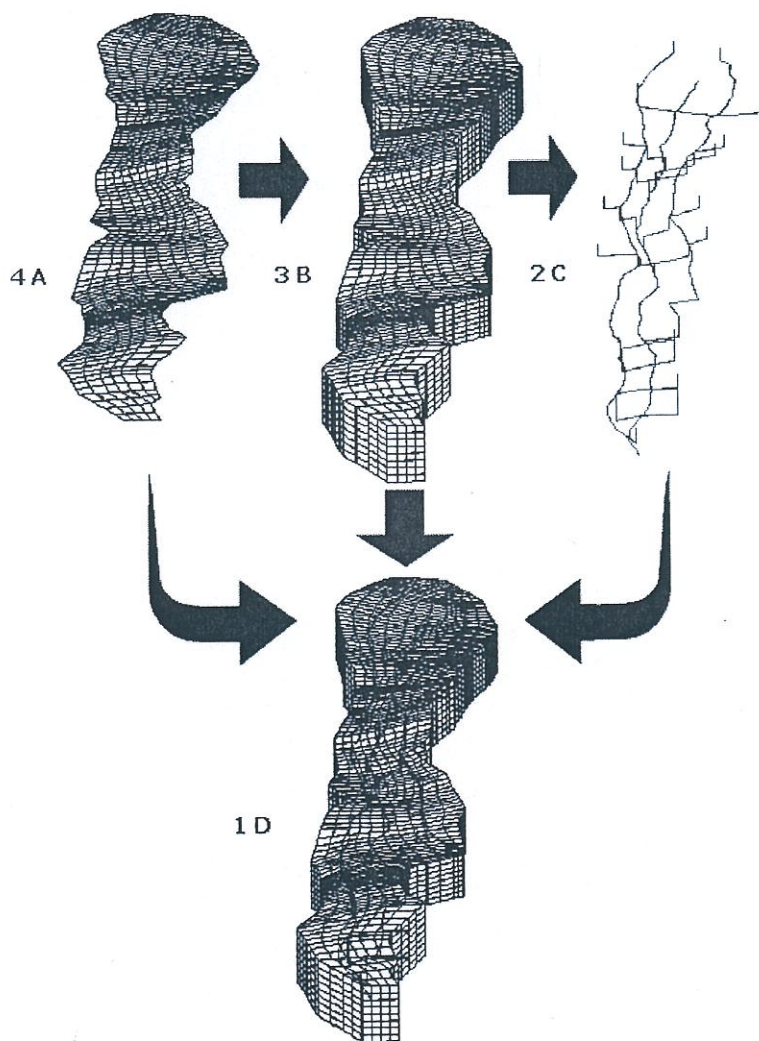


Figura 3.37 – Rede de elementos finitos com 42 841 nós utilizada para simulação do escoamento: (4A) infiltração difusa, (3B) massa rochosa capacitiva com baixa condutividade hidráulica, (2C) condutas cársticas e (1A) rede global de simulação de fluxo

A determinação dos parâmetros hidráulicos, necessária para implementar o modelo, foi efectuada, à escala regional, utilizando modelos analíticos e numéricos (Monteiro, 2002a) e, à escala local, recorrendo a modelos analíticos de interpretação de ensaios de bombagem (Monteiro, 2002b). Estes ensaios de bombagem foram efectuados em parte das numerosas captações existentes nesta área. A discussão da distribuição de parâmetros, bem como a fundamentação do modelo conceptual que permitiu a calibração do modelo encontra-se descrita detalhadamente em Monteiro (2001) e Monteiro e Ribeiro (2002).

#### Impacto na Descarga

De forma a avaliar-se o impacto dos cenários climáticos nos recursos hídricos subterrâneos considerou-se um cenário de referência onde os episódios de recarga ocorrem semanalmente, dado que este tipo de fenómeno é frequente ocorrer nos meses de Setembro a Novembro, altura em que a recarga é significativa.

Os hidrogramas, construídos para as médias de recarga plurimensais para os últimos 40 anos, encontram-se representados na Figura 3.38: Esta figura mostra claramente que o volume de descarga para os granitos é muito menos relevante do que o volume transferido para o rio Sever. Embora aquele tenha um papel importante no aparecimento de pequenas linhas de água.

Na Figura 3.39 estão representados os caudais de descarga nas duas regiões do aquífero atrás descritas, obtidos por simulação numérica utilizando os valores de precipitação dos cenários socioeconómicos dos modelos climáticos (1-HadCM3-B2a; 2-HadCM3-A2c; 3-HadCM3-B2a; 4-HadRM2).

Dos resultados obtidos conclui-se o seguinte:

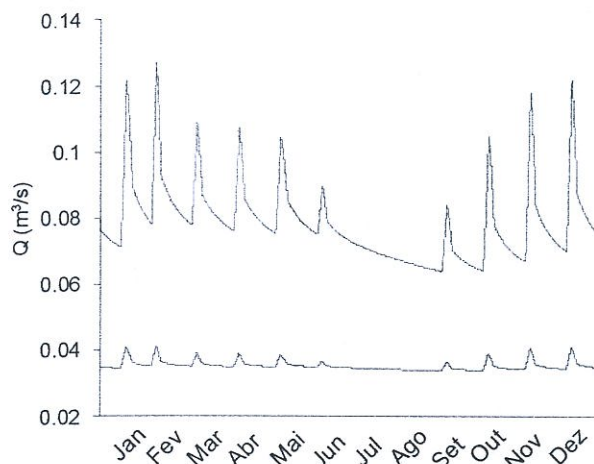


Figura 3.38 – Transferências mensais médias do aquífero para o rio Sever (hidrograma superior) e para as rochas graníticas que contactam o aquífero na área de Castelo de Vide (hidrograma inferior)

#### HadCM3-B2a (2050)

Verifica-se, neste caso, uma ligeira tendência de aumento das descargas no primeiro semestre dado existirem maiores reservas no período seco o que poderá permitir maiores extracções entre Junho e Setembro. Nota-se igualmente uma ligeira diminuição de transferências para o rio Sever entre Setembro e Dezembro embora não conduza a uma diferenciação significativa do regime de descarga habitual neste período. Por último refira-se que não existem alterações sensíveis no que respeita às transferências para as rochas graníticas.

#### HadCM3-A2c (2050)

Nota-se uma tendência generalizada para a diminuição das descargas, mais acentuada no final do ano. O que vai reflectir-se na diminuição do armazenamento no aquífero durante os meses mais secos.

#### HadCM3-B2a (2100)

Neste cenário existe uma situação similar à do cenário HadCM3-B2a, embora o aumento da descarga se reflecta unicamente no segundo trimestre. Neste caso não existe variação sensível do armazenamento durante o período mais seco. Todavia, o decréscimo de saídas durante o período de Setembro a Dezembro é mais perceptível, nas transferências para o rio Sever. Notam-se, por fim, no final do ano, diminuições significativas no regime de escoamento do rio Sever e diminuições ligeiras nas transferências para as rochas graníticas.

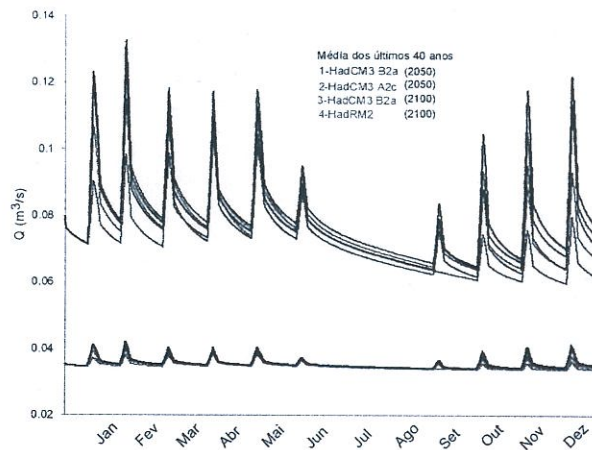


Figura 3.39 – Impacto dos cenários climáticos nas transferências mensais médias do aquífero para o rio Sever (hidrograma superior) e para as rochas graníticas (hidrograma inferior)

#### HadRM2 (2100)

De todos os cenários analisados este é aquele em que as diferenças relativamente à situação de referência são mais acentuadas. Com excepção do período que decorre entre Março e Maio, em que se verifica um ligeiro aumento da descarga, no resto do ano ocorre uma diminuição significativa dos caudais transferidos. Nestas circunstâncias é previsível que o rio Sever passe a ter um caudal muito menor (menos de metade do valor actual entre Outubro e Março), devido à redução do escoamento base proveniente do aquífero. As transferências para as rochas graníticas são negligenciáveis.

### 3.5.3.2 Sistemas Estuarinos e Costeiros

#### Caso de Estudo: Aquífero Superior da Península de Tróia

##### Introdução

Nesta secção estimam-se as alterações induzidas na espessura da lente de água doce subterrânea no aquífero superior da península de Tróia como consequência das alterações nos valores de recarga disponível. Estas alterações condicionarão as disponibilidades de água doce para abastecimento e para manutenção dos ecossistemas.

O caso de estudo insere-se no estudo de Impacte Ambiental da Marina e Novo Cais dos «Ferries» do Tróia Resort realizado para a Imoareia e Imar, tendo sido coordenado por Francisco Andrade, sendo o estudo hidrogeológico do aquífero superior coordenado por Amélia Carvalho Dill (Dill *et al.*, 2001).

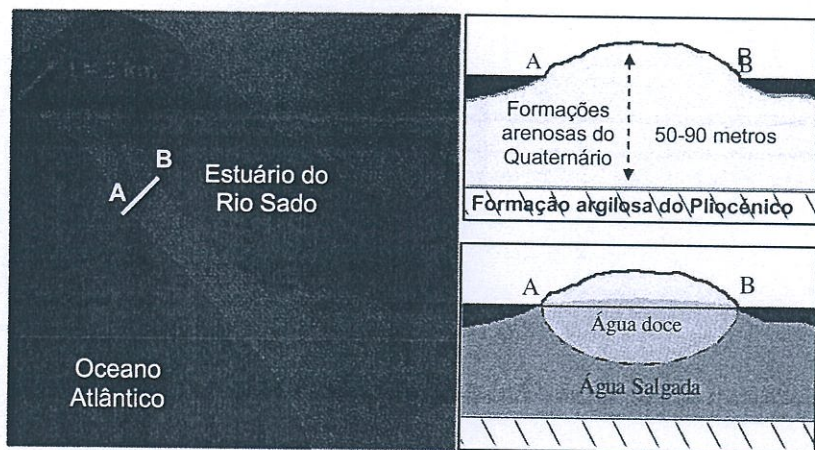


Figura 3.40 – Enquadramento geográfico e conceptualização litológica e hidrogeológica do aquífero superior da península de Tróia (Nunes *et al.*, 2002)

e largura média igual a 1000 metros, que constitui a parte emersa de um formação porosa de granulometria moderada fina, limitada inferiormente por uma formação que, em termos de modelação, se considera impermeável. Foram utilizados os parâmetros constantes na Tabela 3.7 e valores de recarga efectiva iguais a 90 %, 80 %, 70 % e 60 % da actual, tal como previsto pelos modelos climáticos.

Assume-se que a península se pode dividir em duas regiões bem definidas: a) um bordo com 200 m de largura, onde o efeito da maré se faz sentir; b) uma região interior onde o efeito da maré é imperceptível. A largura da região exterior foi determinada de acordo com a metodologia descrita na secção 3.3 e validada com os resultados de ensaios de maré.

A península de Tróia situa-se 30 km a sul de Lisboa. Banhada na costa Oeste pelo oceano Atlântico e na costa Este pelo estuário do Sado, esta península tem uma largura de 2000 m e um comprimento de 12 000 m. A formação litológica mais superficial, compreende areias de diferentes granulometrias (fina a grosseira) do Quaternário, apresentando uma espessura de 50 a 90 m. Esta formação porosa assenta em formações argilosas do Pliocénico com condutividades hidráulicas verticais muito baixas constituindo deste modo uma barreira natural ao fluxo. Na Figura 3.40 esquematiza-se a localização da península assim como a conceptualização litológica e hidrogeológica.

Figura descrita na secção 3.3 e validada com os resultados de ensaios de maré.

### Impacto na Interface Água Doce-Água Salgada

Na Figura 3.41 estão representadas as interfaces actual e as previstas utilizando valores de recarga efectiva de 90 %, 80 %, 70 % e 60 % do valor de recarga actual, que corresponde a cenários dos efeitos das alterações climáticas na área em estudo.

Os resultados mostram para aqueles cenários recessões na espessura da lente de água doce de 5,1 %, 5,7 %, 6,5 % e 7,4 %, respectivamente. O período de recuperação do equilíbrio dinâmico do sistema após alteração do regime de recarga é da ordem de cinquenta anos.

Tabela 3.7 – Parâmetros de modelação (Dill *et al.*, 2001)

Parâmetro	Valor
$f$ (Recarga) (m/d/m <sup>2</sup> )	$2,33 \times 10^{-4}$
$K$ (m/d)	10
$S$	0,25
Espessura saturada, $b$ (m)	40
Largura máxima (m)	2000
Período de maré, $t_0$ (d)	0,53
Amplitude da maré, $H_0$ (m)	0,98
Porosidade	0,3
$\rho_{\text{água doce}}$ (kg/m <sup>3</sup> )	1000
$\rho_{\text{água do mar}}$ (kg/m <sup>3</sup> )	1025

### Modelo Conceptual

A fase de modelação deverá permitir estimar a volumetria da lente de água doce, isto é, profundidade da água doce e espessura da lente em todo o domínio. O domínio de modelação é considerado como uma ilha de comprimento infinito

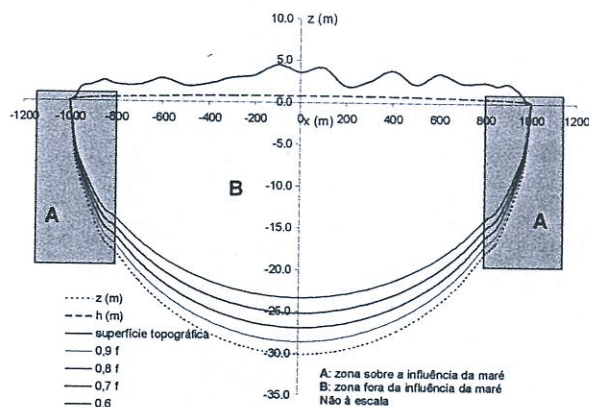


Figura 3.41 – Estimativa da espessura da lente de água doce no aquífero superior da península de Tróia: Situação com a recarga actual, e com recargas efectivas de 90 %, 80 %, 70 % e 60 % da actual

## Caso de Estudo: Orla Meridional

### Introdução

A intrusão marinha é um fenómeno que tem afectado, em todo o mundo, os aquíferos costeiros mais produtivos e, por isso, intensamente utilizados como origens para o abastecimento às populações, à indústria e à agricultura.

Em Portugal o fenómeno de contaminação salina por intrusão marinha não tem sido estudado com o rigor e a profundidade que se exigiria. Para esse facto tem contribuído a escassez de trabalhos hidrogeológicos especializados e a ausência de redes de monitorização específicas implementadas nos aquíferos costeiros em risco de salinização. Existem todavia alguns indicadores que confirmam que o fenómeno ocorre ou poderá ocorrer, com maior ou menor magnitude, em alguns aquíferos costeiros da Orla Meridional onde por vezes o avanço da interface salina se efectua a partir de cursos de água preferenciais. Deste modo, os valores de concentração do ião cloreto observados em algumas captações, associados à forte correlação entre tendências de aumento da concentração daquele parâmetro com as de descida dos valores piezométricos, detectada em certos períodos temporais, vêm comprovar esse facto. Nos aquíferos da Mexilhoeira Grande-Portimão e Ferragudo-Albufeira, os cloretos apresentam valores da ordem dos 500 mg/l, isto é, muito acima do VMA o que poderá confirmar a ocorrência, ainda que por vezes sazonal, de um fenómeno de intrusão salina (Salgueiro e Ribeiro, 2001).

O Algarve apresenta igualmente vários problemas de salinização, proveniente de processos de dissolução de rochas evaporíticas (Carreira, 1991; Ribeiro, 1998; Ribeiro, 1999).

No caso do sistema aquífero da bacia do Tejo-Sado/Margem Esquerda, a intrusão salina pode advir da drenância entre camadas hidrogeológicas, induzida pela bombagem excessiva do aquífero confinado em áreas perto da costa ou do estuário (Ribeiro, 1994). O mesmo fenómeno foi detectado na simulação do modelo numérico do Cretácico de Aveiro: a contaminação salina é proveniente da mistura com águas de outras camadas aquíferas, umas mais profundas, outras mais superficiais, mas com elevado grau de mineralização e que actualmente apresentam potenciais hidráulicos superiores às principais camadas aquíferas exploradas (Condesso de Melo, 2002).

Como já se referiu, a inexistência de redes de controlo da posição da interface água doce-água salgada, nomeadamente na zona costeira da Orla Meridional algarvia, com um mínimo de representatividade espaciotemporal, inviabiliza, exceptuando alguns raros casos, uma previsão do

movimento daquela interface salina, utilizando modelos numéricos de simulação.

Considerando este estado de coisas, optou-se por escolher uma abordagem metodológica de natureza expedita para a análise do efeito das alterações climáticas nos aquíferos costeiros e com campo de aplicação o mais abrangente possível.

### A Interface Água Doce-Água Salgada

O contacto entre a água doce e a água salgada cria uma zona de transição, a interface água doce-água salgada, que em condições naturais pode sofrer alterações a longo prazo, devido às modificações das condições climáticas e ainda às causadas pelos efeitos de marés.

O tratamento do problema da interface água doce-água salgada pode ter duas abordagens: considerar a interface como sendo uma zona de transição brusca, isto é, passa-se directamente da água doce para a água salgada; ou considerar a interface como uma zona de variação contínua da concentração de sais e da densidade, causada por dispersão hidrodinâmica.

### Impacto na Interface Água Doce-Água Salgada

Um dos efeitos mais previsíveis das alterações climáticas nos recursos hídricos subterrâneos é o que resulta do impacto que terá a subida do nível do mar na posição da interface água doce-água salgada nos aquíferos costeiros e nas ilhas (IPCC, 2001).

Por exemplo, e de acordo com a aproximação de Ghyben-Herzberg, uma subida de 50 cm do nível médio do mar causará uma redução de 20 m na espessura da lente de água doce num aquífero costeiro.

Para além da subida do nível do mar outros factores poderão ter influência directa ou indirecta no avanço da interface, tal como a redução esperada da pluviometria para diversos cenários climáticos, o que provocará uma descida dos níveis piezométricos, resultante não só da diminuição da recarga efectiva dos aquíferos como da exploração mais intensiva dos aquíferos costeiros por insuficiência de recursos hídricos superficiais.

O caso de estudo tem dimensão regional e considera um nível médio de piezometria dos aquíferos costeiros da Orla Meridional algarvia e que, não obstante as especificidades litológicas, geomorfológicas e hidrodinâmicas de cada uma

das unidades aquíferas, se considera representativo da zona costeira daquela unidade hidrogeológica.

Através da aproximação de Ghyben-Herzberg, foi possível a partir do estado piezométrico actual dos sistemas aquíferos da Campina de Faro, da Quarteira, de Albufeira-Ribeira, de Quarteira e de Ferragudo-Albufeira, estimar a posição média da interface salina.

A Figura 3.42 mostra as variações na profundidade em que se encontra a interface salina para os meses de Fevereiro (altura do ano onde ela se localiza a maior profundidade), e de Setembro (altura do ano em que ela se encontra mais próxima da superfície) e ainda a sua posição média anual.

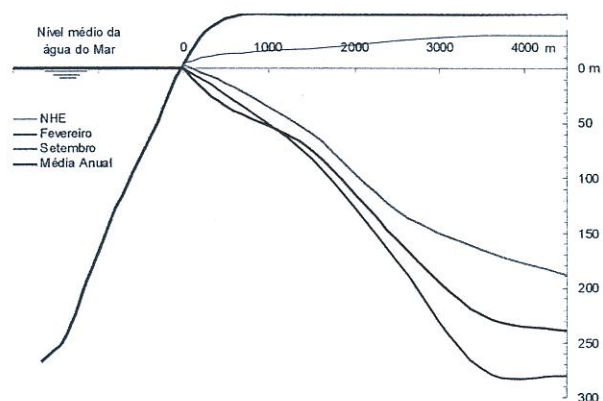


Figura 3.42 – Posição actual da interface salina. Caso de estudo localizado na Orla Meridional algarvia

Com base na configuração actual da interface salina, e conhecendo-se as previsões do nível médio da água do mar (Figura 3.43) dadas pelos cenários climáticos, é possível determinar então a magnitude da sua variação.

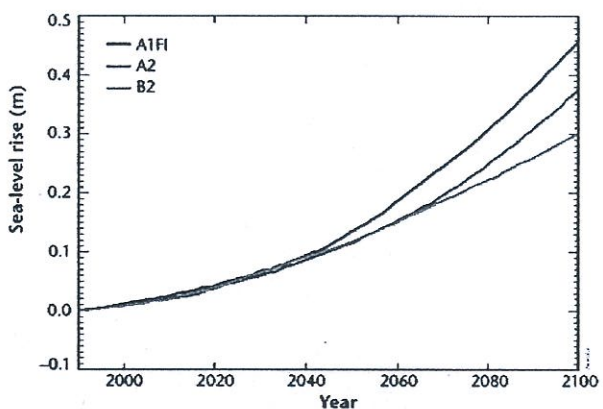


Figura 3.43 – Projecções da subida do nível do mar até 2100, utilizando o modelo HadCM3 para os cenários climáticos A1FI, A2 e B2

Após as simulações efectuadas (Figura 3.44), conclui-se que a variação do nível médio da água do mar, prevista em 2050, pelos cenários B2 e A2, e que é da ordem dos 0,12 m, irá provocar uma redução de 4,8 m na espessura da lente de água doce, nos aquíferos costeiros acima referidos.

Para 2100, e de acordo ainda com os cenários B2 e A2, ocorrerá, por sua vez, uma subida do nível médio do mar de 0,3 m e 0,37 m, respectivamente, o que terá como consequência uma redução de 12 m e 14,8 m na espessura da lente de água doce.

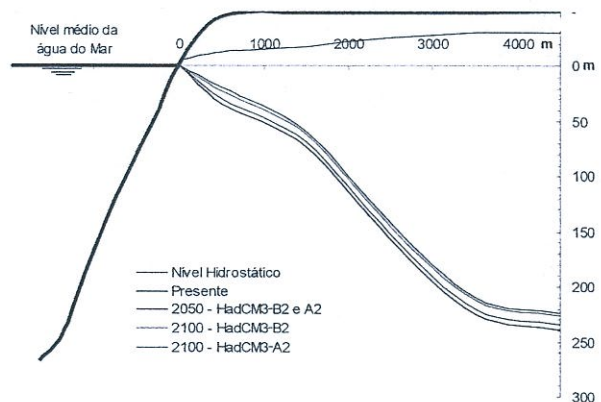


Figura 3.44 – Previsão do avanço da interface para os anos 2050 e 2100. Projecções médias anuais utilizando os cenários A2 e B2 do modelo HadCM3. Caso de estudo localizado na Orla Meridional algarvia

### 3.5.4 Qualidade da Água Subterrânea de Aquíferos Sujeitos a Agricultura Intensiva

#### 3.5.4.1 Contaminação Agrícola

Tendo em conta que as previsões dos cenários climáticos apontam em termos gerais para um aumento dos períodos de seca, da evapotranspiração e da temperatura, então será expectável um aumento da concentração de sais no subsolo e consequentemente um aumento de salinização da água subterrânea.

Actualmente, em Portugal, muitas áreas são afectadas por esta ocorrência, sobretudo em aquíferos mais superficiais, onde a água atinge valores de salinização que a tornam imprópria para rega e para consumo. Na região do Baixo Alentejo, onde a precipitação é baixa e a evapotranspiração atinge valores bastante elevados no Verão, os níveis de salinidade das águas subterrâneas têm cerca de metade da salinidade da água do mar.

Para além desses efeitos, causados por processos exclusivamente naturais, há a salientar outros mais específicos, que

ocorrem em aquíferos carbonatados, e que poderão deteriorar a qualidade da água subterrânea, ao nível da dureza, e que é devido ao aumento da solubilidade das rochas carbonatadas, provocado pelo aumento do CO<sub>2</sub> e da temperatura (Younger *et al.*, 2002).

Por outro lado, a qualidade da água subterrânea está regra geral ameaçada directa ou indirectamente por actividades antrópicas. Quer o uso do solo, quer as práticas agrícolas têm um efeito muito significativo sobre a qualidade da água. Os cenários a analisar estarão por esse motivo muito condicionados pelo tipo de políticas de ordenamento de território adoptadas e das acções de controlo das fontes de poluição pontual ou difusa a implementar (IPCC, 2001).

Um dos impactos das alterações climáticas expectáveis será nas actividades agrícolas, quer ao nível da modificação dos tipos de cultura, quer ao nível dos padrões de ocupação do solo devido à eventual adaptação das práticas de rega aos novos cenários climáticos e ao novo quadro socioeconómico. Desse modo será previsível que essas alterações venham a ter um efeito previsível na quantidade e qualidade dos recursos hídricos subterrâneos disponíveis nessas áreas. Em muitos dos casos já estudados, esses efeitos indirectos terão inclusivamente muito mais impacto do que os efeitos directos.

#### 3.5.4.2 Caso de Estudo: Sistema Aquífero dos Gabros de Beja

##### Hidrogeologia

O sector em estudo (Figura 3.45), com uma área de 48 km<sup>2</sup>, pertence ao sistema aquífero dos gabros de Beja e localiza-se na margem esquerda do rio Guadiana (INAG, 1997).

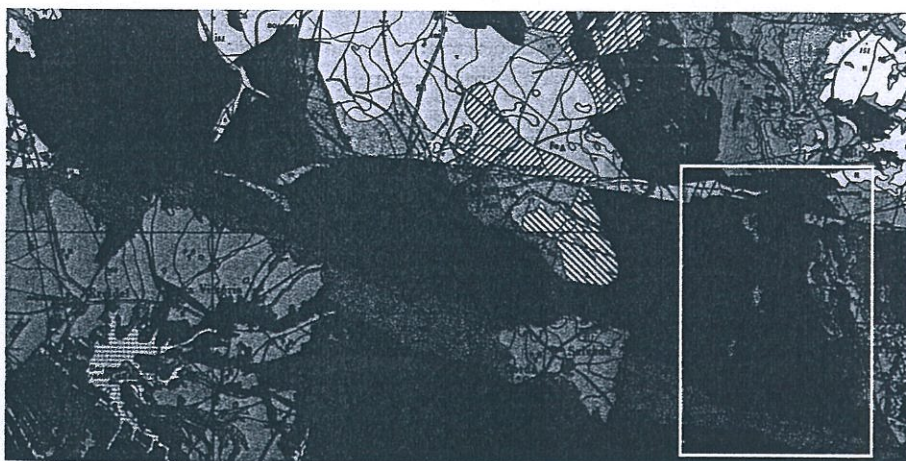


Figura 3.45 – Enquadramento geológico do aquífero dos gabros de Beja – Sector da margem esquerda do rio Guadiana (extraído da folha geológica n.º 8 à escala 1:200 000. Fonte: INETI)

O sistema aquífero dos gabros de Beja, como uma área de 350 km<sup>2</sup>, está situado entre Ferreira do Alentejo (W), Beja e Serpa (E). A região é caracterizada por uma predominância de rochas básicas.

##### Ocupação do Solo

Os solos desta região possuem uma elevada capacidade para uso agrícola. As principais culturas são o trigo, o milho e o girassol e, mais recentemente, o olival de regadio (Figura 3.46). Para além das áreas de uso agrícola, existem ainda outros usos com uma representação significativa, designadamente o olival (21,5 %), as áreas de matagal (oliveiras, azinheiras e carrascal) e os territórios agroflorestais (12,8 %).

##### Susceptibilidade à Contaminação Agrícola

A avaliação da vulnerabilidade à poluição de origem agrícola recorreu ao Índice de Susceptibilidade. O mapa do Índice de Susceptibilidade (Figura 3.47 – Presente), calculado no sector em estudo (Serra, 2002; Serra *et al.*, 2003; Ribeiro *et al.*, 2003), mostra que não existem classes de valores extremos (nem muito baixas nem extremamente elevadas). As áreas que apresentam maior susceptibilidade ({60-70}) são aquelas em que existe actividade agrícola e onde se cultiva, predominantemente, o trigo. São igualmente áreas em que o tipo de litologia é mais permeável. A classe predominante é a {40-50}, uma classe de susceptibilidade média, para a qual contribuem a ocupação agrícola do solo, uma profundidade reduzida do nível freático e uma situação intermédia no que respeita à permeabilidade das formações rochosas (gabrodioritos).

##### Impacto na Qualidade da Água

Uma alteração do uso do solo provocado pela mudança das práticas e culturas como resposta às alterações climáticas irá provocar um efeito indirecto na qualidade da água subterrânea. Esse impacto poderá ser avaliado medindo a magnitude de variação do grau de susceptibilidade das formações aquíferas calculado para vários cenários agroclimáticos.

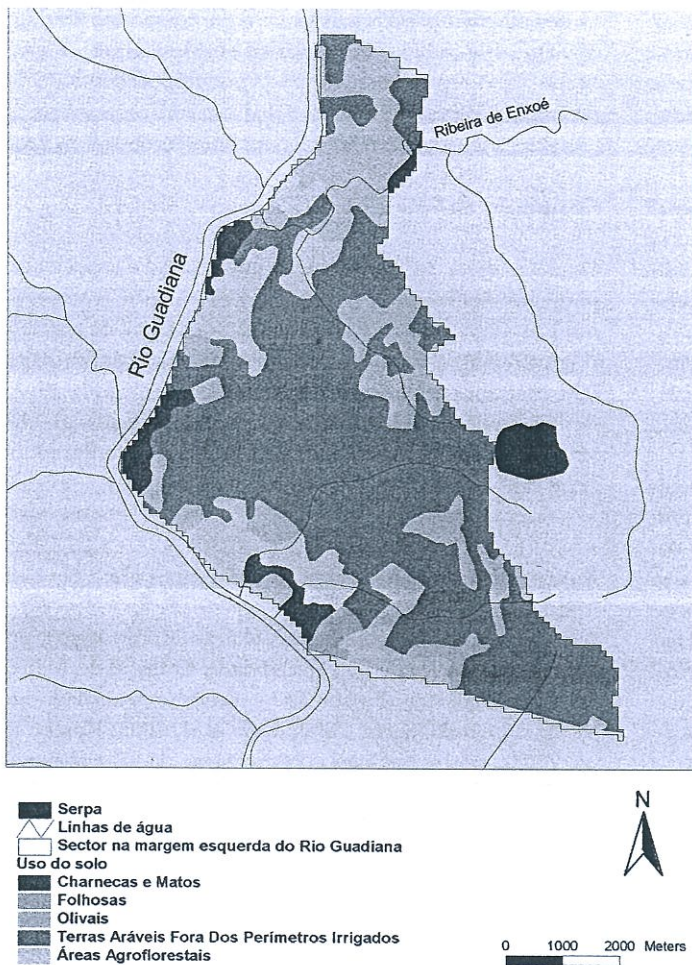


Figura 3.46 – Ocupação do solo no sector da margem esquerda do rio Guadiana

Dada a natureza dos parâmetros de entrada deste método, para o cálculo dos cenários futuros apenas foram consideradas variações nos valores de recarga subterrânea e uso do solo. Os resultados estão representados na Figura 3.47.

Como mostra a Figura 3.47, para o horizonte temporal de 2050, caso ocorra uma intensificação das práticas agrícolas, o cenário B2a prevê um aumento significativo da susceptibilidade do aquífero à poluição. Este aumento deve-se à subida do valor de precipitação considerada por este cenário, alterando-se deste modo a classe da recarga considerada para o cálculo.

Se se considerar, contudo, uma atenuação das práticas agrícolas, então, segundo o mesmo cenário, é expectável uma diminuição do risco de contaminação do aquífero.

Em seguida analisou-se uma situação para o cenário A2c, caracterizada por uma alteração do uso do solo e uma manutenção dos valores actuais de recarga. Nesta situação a

intensificação ou atenuação das práticas agrícolas poderá alterar de forma positiva ou negativa os valores do IS.

O mesmo cenário ocorrerá para o horizonte 2010.

### 3.5.5 Risco de Cheias

Para avaliar as alterações do risco de cheias, foram analisados os resultados diários dos modelos HadCM3 e HadRM2. Apesar de não terem sido simuladas as condições de escoamento à escala diária, os regimes de precipitação estão fortemente correlacionados com os regimes de escoamento.

Os cenários climáticos estimados pelos modelos globais e regionais apontam para uma clara tendência de concentração da precipitação nos meses de Inverno, que poderá traduzir-se num aumento efectivo da precipitação média entre os meses de Dezembro e Fevereiro. Esta tendência é um forte indicador para um aumento do risco de cheia em Portugal.

A tendência para o agravamento de precipitações extremas é observada em todo o país, mas é mais clara na região Norte do país. Nesta região, os resultados apontam para um aumento da precipitação da ordem dos 5 mm nos 30 dias mais húmidos do ano (Figura 3.48). Admite-se ainda que o número de dias com valores de precipitação acima de 20 mm aumentará de 9 para 13. Nas restantes regiões do país, o cenário de aumento da precipitação intensa é mais atenuado, admitindo-se um aumento da precipitação diária da ordem dos 5 mm nos 20 dias mais húmidos e nos 10 dias mais húmidos, respectivamente nas regiões Centro e Sul.

Os dados registados da rede do INAG indicam que o número médio de dias por ano com valores de precipitação acima de 20 mm é bastante superior ao apresentado pela corrida de controlo dos modelos climáticos. Apesar desta discrepância, o importante é realçar a tendência de concentração da precipitação sugerida por estes modelos.

Em conjunto com o aumento de fenómenos de precipitação intensa, a subida do nível médio dos oceanos poderá também contribuir para um aumento do risco de cheias, através da diminuição da capacidade de escoamento na foz dos rios de maior dimensão. Consequentemente, as áreas ribeirinhas mais a jusante, tais como o vale do Tejo ou a área da Ribeira

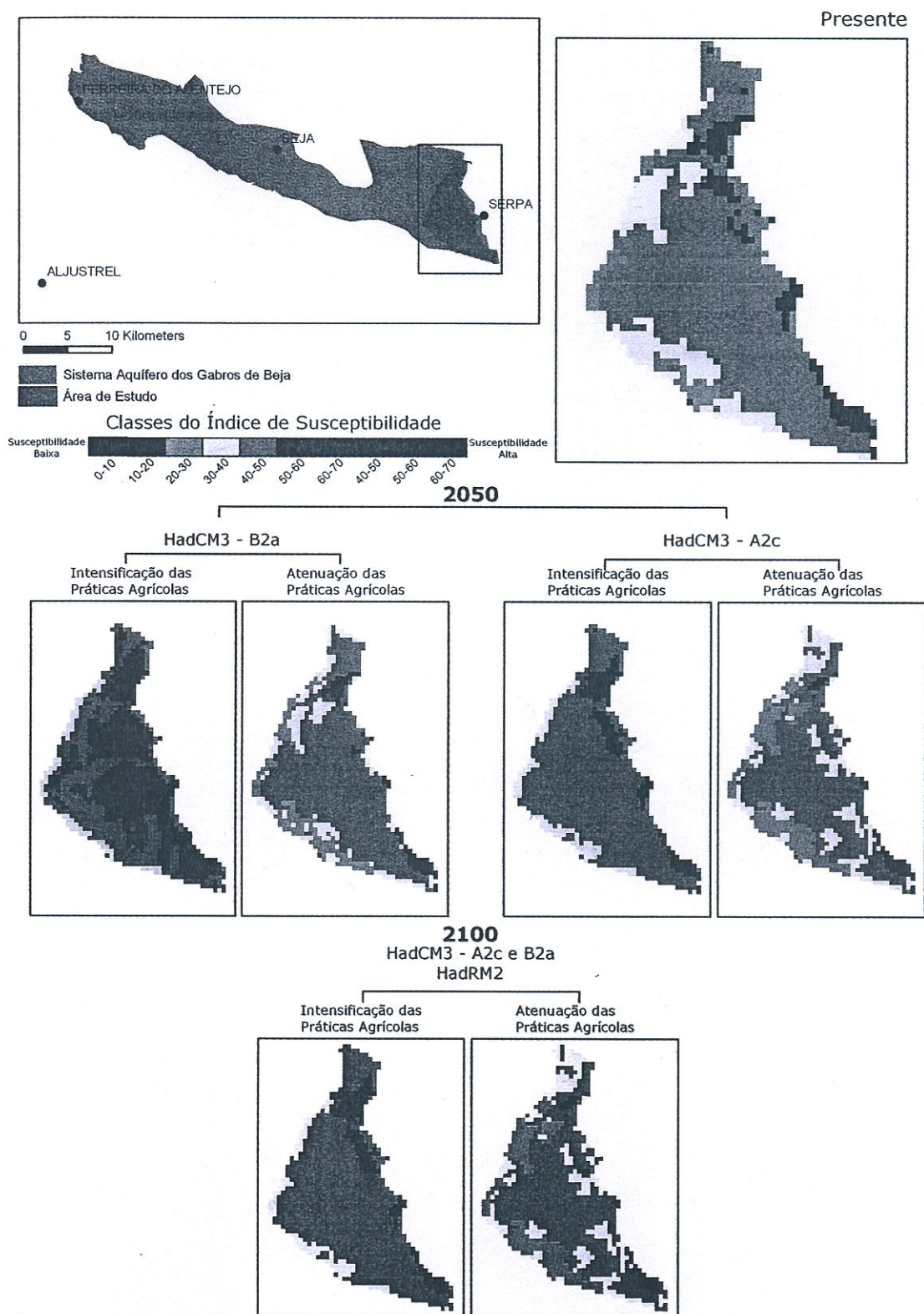


Figura 3.47 – Sector da margem esquerda do rio Guadiana no aquífero dos gabros de Beja: Localização; Mapa de susceptibilidade à contaminação agrícola; Alteração dos graus de susceptibilidade para vários cenários agroclimáticos em 2050 e 2100

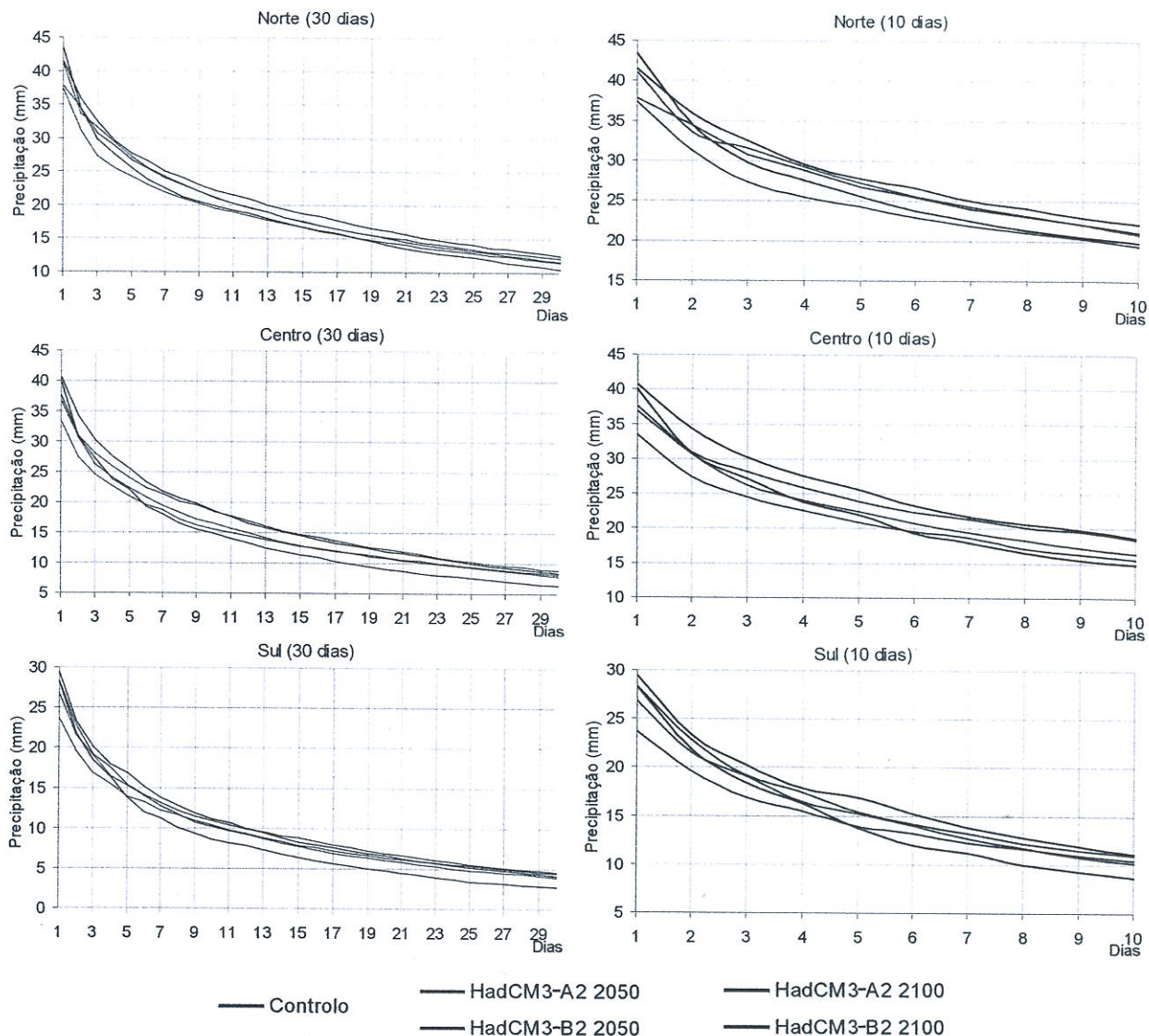


Figura 3.48 – Curvas de duração da precipitação diária para diferentes cenários climáticos

na cidade do Porto, poderão ver aumentar o risco local da ocorrência de cheias.

### 3.6 ESTUDOS A DESENVOLVER NO FUTURO

O objectivo do presente estudo é, como se referiu, caracterizar os impactos das alterações climáticas sobre os recursos hídricos de Portugal Continental, tendo como horizonte o final do século XXI. Porém, a análise realizada é afectada por incertezas e não permite, por si só, concretizar este objectivo. Com efeito, para além de identificar os impactos directos

sobre a quantidade dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos, será necessário considerar também outros impactos. Refere-se, em seguida, um certo número de aspectos a ter em conta em estudos a desenvolver no futuro.

#### 3.6.1 Impactos sobre a Ocorrência de Cheias e Secas

As alterações climáticas não determinam apenas modificações dos valores médios do escoamento, mas também dos seus valores extremos, provocando alterações dos regimes de cheias e de secas. Em particular, podem ocorrer alterações

da intensidade, duração e períodos de ocorrência das cheias e secas. Neste trabalho estudaram-se os impactos das alterações climáticas em valores extremos de precipitação mas não foram analisados os impactos das alterações climáticas sobre o regime de caudais em períodos de cheia e de seca.

Evidencia-se uma tendência geral para um acréscimo da precipitação na época húmida e um decréscimo de precipitação na época seca, com particular incidência no Norte de Portugal. O regime de escoamento deverá seguir esta tendência geral, sendo assim de esperar uma intensificação das cheias e secas em consequência das alterações climáticas. É ainda de esperar que as inundações provocadas pelas cheias nos troços dos rios nas regiões costeiras possam ser agravadas pela subida do nível do mar associada às alterações climáticas.

### 3.6.2 Impactos sobre a Qualidade da Água

As alterações climáticas podem ter consequências directas e indirectas sobre a qualidade da água.

A alteração do regime de precipitação pode ocasionar uma alteração da afluência de substâncias poluentes ao meio hídrico, através da erosão e do transporte de sedimentos, e do arrastamento de fertilizantes e de pesticidas utilizados na agricultura, assim como de resíduos urbanos e industriais.

A redução do escoamento pode, também, ter consequências indirectas sobre a qualidade da água, em resultado da modificação das condições de absorção das cargas poluentes pelo meio hídrico. Na realidade, a redução do caudal dos cursos de água conduzirá ao aumento da concentração de poluentes e à redução da capacidade de assimilação das cargas poluentes pelo meio hídrico, mesmo que estas cargas não aumentem em valor total.

Além disso, o aumento de temperatura associado às alterações climáticas terá também impactos directos sobre a qualidade da água, provocando uma diminuição do nível de saturação de oxigénio dissolvido na água ou condicionando os processos químicos e biológicos que ocorrem nos meios hídricos, com consequências, por exemplo, nos fenómenos de eutrofização e no comportamento dos ecossistemas.

No que se refere às águas subterrâneas é mal conhecida a resposta dos sistemas aquíferos ao aumento da temperatura da água, podendo ocorrer uma retenção ou libertação de gases com efeito de estufa, os quais, por sua vez, favorecem a dissolução dos minerais. No entanto, é expectável que um aumento da temperatura no subsolo propicie um aumento da concentração de sais, devido a um aumento das taxas de evapotranspiração e a uma maior capacidade da água para dissolução de sais.

Nos aquíferos costeiros, dependendo da evolução dos níveis de piezometria e da subida do nível médio da água do mar, o avanço da interface água doce-água salgada será a maior preocupação no que respeita à qualidade da água destes aquíferos. Dada a concentração de importantes sistemas aquíferos junto à costa, torna-se necessário expandir e aprofundar o estudo deste fenómeno a mais aquíferos costeiros de Portugal.

Nos estudos a realizar futuramente haverá, pois, que procurar dedicar particular atenção ao estudo dos impactos das alterações climáticas sobre a qualidade da água.

### 3.6.3 Impactos sobre a Procura de Água

As mudanças de temperatura associadas às alterações climáticas não condicionam apenas as disponibilidades de água, mas podem, também, ter impactos sobre a procura de água, tendendo a aumentá-la. Estes impactos podem ser particularmente significativos no caso da utilização da água para a agricultura, aumentando a procura de água para irrigação em consequência da intensificação da evapotranspiração e da diminuição da humidade do solo. Podem também ocorrer impactos significativos sobre a procura de água para certas utilizações industriais, como é o caso, por exemplo, dos sistemas de arrefecimento hidráulico, ou para determinadas utilizações domésticas e municipais, como é o caso das utilizações relacionadas com a alimentação humana, os banhos, a lavagem de ruas ou a rega de parques e jardins. Por fim, também se podem registar impactos das alterações climáticas sobre a procura da água pelos ecossistemas.

Em sentido oposto, deve-se notar que um aumento da frequência da ocorrência de secas em consequência das alterações climáticas pode conduzir a uma redução da procura da água, em resultado da adopção de tecnologias de poupança da água.

Assim, é importante que se desenvolva, no futuro, uma crescente percepção dos impactos das alterações climáticas sobre a procura de água, reforçando-se os sistemas de monitorização incidindo sobre os principais utilizadores de água na agricultura e na indústria e sobre grupos de utilizadores domésticos que possam ser considerados amostras representativas.

### 3.6.4 Estudo Integrado dos Impactos das Alterações Climáticas sobre os Recursos Hídricos das Bacias Hidrográficas Luso-Espanholas

Na secção 3.5.1 discutem-se os cenários dos impactos das alterações climáticas sobre os recursos hídricos das bacias

internacionais em Portugal e em Espanha, verificando-se uma razoável concordância dos resultados relativos aos dois países (Figura 3.22).

Os estudos realizados em Espanha relativos aos impactos das alterações climáticas sobre os recursos hídricos daquele país são menos elaborados do que o trabalho levado a cabo no presente estudo relativamente a Portugal. Indicam-se como principais referências as breves análises da questão feitas no Livro Branco da Água (MMA, 2000) e no Plano Hidrológico Espanhol (MMA, 1998), os trabalhos mais consistentes desenvolvidos no Instituto Geológico e Mineiro (Ayala-Carcedo, 1996 e 2000; Ayala-Carcedo e Iglésias López, 2000), e os estudos realizados no Centro de Estudos Hidrográficos (Fernandez-Carrasco, 2000 e 2002) que seguem uma linha idêntica à do estudo realizado em Portugal, mas que não foram levados suficientemente longe para permitir uma generalização dos resultados a Espanha no seu conjunto.

Parece ter o maior interesse a futura realização, em Portugal e em Espanha, de estudos conjuntos dos impactos das alterações climáticas sobre os recursos hídricos ibéricos. A Península Ibérica corresponde a uma unidade fisiográfica bem identificada e, em particular no que toca aos rios partilhados, teria todo o sentido que os dois países trabalhassem em conjunto, utilizando metodologias comuns. As bacias hidrográficas luso-espanholas constituem um magnífico laboratório natural onde os cientistas dos dois países se deveriam unir em equipas de investigação binacionais e interdisciplinares para estudar os problemas técnico-científicos dos recursos hídricos de um modo geral e, em particular, no que toca ao estudo dos impactos das alterações climáticas.

### 3.7 CONCLUSÕES

Tomando por base os resultados que foram apresentados no presente estudo, é possível referir as seguintes conclusões relativas aos impactos das alterações climáticas sobre os recursos hídricos de Portugal:

- Os cenários estudados não apresentam uma tendência clara do escoamento anual, muito embora todos admitam uma significativa alteração da sua distribuição sazonal.
- O resultado das simulações prevê uma tendência para a concentração do escoamento nos rios nos meses de Inverno, induzida por uma distribuição similar da precipitação. Esta tendência acentuará a assimetria sazonal da disponibilidade hídrica em Portugal Continental.
- A esmagadora maioria dos cenários prevê uma tendência de redução do escoamento na Primavera, Verão e Outono.

- A magnitude, medida em termos relativos, dos impactos das alterações climáticas sobre o escoamento aumenta de norte para sul.
- A magnitude das estimativas de aumento do escoamento é menor que a magnitude das estimativas de redução. As primeiras atingem no máximo 40 %, enquanto que as segundas podem atingir 80 %.
- O cenário mais pessimista prevê uma redução do escoamento médio anual até 2050 entre os 10 %, a norte do Douro, e 50 % na região do Algarve. Esta tendência acentua-se para 2100, admitindo que a redução do escoamento anual médio possa atingir 80 % no Algarve.
- Os restantes cenários prevêem um aumento do escoamento anual médio que pode atingir, em 2100, os 20 %, de acordo com o cenário HadCM3-B2a, ou os 40 %, de acordo com o cenário HadRM2.
- A concentração da precipitação nos meses de Inverno e a estimativa do aumento generalizado da frequência de chuvas intensas deverá aumentar a magnitude e a frequência dos episódios de cheia, particularmente no Norte do país.
- Prevê-se que a qualidade da água se degrade devido ao aumento da temperatura e à redução do escoamento nos meses de Verão, particularmente na região Sul.
- Prevê-se um rebaixamento dos níveis freáticos nos aquíferos mais superficiais, devido à redução esperada da recarga e do aumento das taxas de evaporação.
- Prevê-se uma degradação dos ecossistemas fluviais que sejam muito dependentes da água subterrânea.
- Prevê-se uma redução da espessura da lente da água doce e um aumento da contaminação salina devido ao avanço da interface salina em aquíferos costeiros, em consequência da subida do nível do mar provocada pelo aumento da temperatura relacionada com as alterações climáticas.
- Prevê-se também uma modificação dos caudais de descarga dos aquíferos para os rios, relacionada com a redução esperada da recarga.
- Prevê-se, uma alteração dos graus de vulnerabilidade dos aquíferos à poluição agrícola relacionada com as alterações do uso do solo e das práticas agrícolas.

Em resumo, deve-se esperar um aumento da assimetria sazonal e espacial da distribuição de água, um aumento do risco de cheias e uma diminuição da qualidade da água. Existe

ainda uma probabilidade muito significativa de diminuição geral das disponibilidades hídricas. Os impactos sobre as disponibilidades hídricas geradas em Espanha, deverão fazer sentir os seus efeitos no território português. A subida do nível médio do mar, devido às alterações climáticas poderá afectar a disponibilidade e qualidade das águas subterrâneas, reduzindo, assim, uma vez mais, as disponibilidades totais de água.

A fim de se avaliar exaustivamente os impactos das alterações climáticas nos recursos hídricos, além de se estimar os impactos sobre as disponibilidades hídricas, é necessário estudar também a variação das necessidades hídricas futuras para as diferentes utilizações. Esta tarefa é difícil, pois depende das reacções sociais e económicas à situação modificada. No entanto, dado que 75 % da totalidade das necessidades de água estão associadas ao sector da agricultura, espera-se um aumento da procura de água devido ao aumento da temperatura.

A concluir, parece ter interesse discutir alguns aspectos importantes relacionados com as futuras políticas de gestão da água, que deverão ser adaptadas para enfrentar os impactos das alterações climáticas nos recursos hídricos.

O desafio das alterações climáticas deverá ser objecto de uma atenção crescente na definição das estratégias e políticas de gestão de recursos hídricos. O argumento de que os impactos das alterações climáticas não são completamente conhecidos e que há ainda muitas incertezas não deve ser uma razão para adiar a acção. Os resultados dos diversos estudos já realizados permitiram identificar algumas tendências com uma elevada probabilidade de ocorrência, as quais deverão ser consideradas nas estratégias e nas políticas de gestão da água.

Além disso, uma boa política de gestão da água requer uma capacidade de decidir em condições de incerteza. Os responsáveis e os gestores de recursos hídricos deverão agir com base em previsões actualizadas do regime hidrológico. Por isso, eles deverão procurar planear antecipadamente as respostas mais adequadas aos cenários futuros, seleccionando políticas flexíveis e adaptáveis que sejam capazes de reagir rapidamente a situações específicas.

Nesta perspectiva, a consideração dos impactos das alterações climáticas não requer nenhuma mudança drástica das práticas de gestão da água, pois aquelas constituem apenas uma fonte adicional da incerteza susceptível de influenciar os valores futuros da disponibilidade e procura de água. A principal mudança conceptual deverá ser o abandono do

pressuposto tradicional da engenharia que considera o clima histórico como um indicador credível das circunstâncias futuras. Os responsáveis pela gestão da água devem, pois, começar a considerar as alterações climáticas como uma variável de decisão.

A não consideração das alterações climáticas no processo de gestão dos recursos hídricos portugueses virá tornar esta gestão mais difícil e complexa. A diminuição potencial das disponibilidades de água e o aumento das assimetrias sazonais, juntamente com a ocorrência de condições mais restritivas em termos da qualidade de água e de risco de cheias, apenas vem reforçar a importância de adoptar políticas de gestão da água baseadas num sólido e profundo conhecimento da realidade dos recursos hídricos portugueses. Isto realça a necessidade de ampliar os estudos de avaliação dos recursos hídricos e de realizar investigação adicional sobre as alterações climáticas, de modo a que a informação sobre as alterações climáticas possa condicionar as práticas de gestão da água.

De acordo com IPCC (2001), tal conhecimento deverá incluir uma consideração explícita de todas as potenciais intervenções do lado da procura e do lado da oferta de água. Além disso, as medidas de adaptação deverão ser planeadas à escala das bacias hidrográficas, levando em conta todos os agentes locais, que, directa ou indirectamente, interajam com o meio hídrico.

Além das questões anteriormente descritas, que são particularmente relevantes para os gestores da água, deverão ser também consideradas outras questões de âmbito mais geral relacionadas com o planeamento económico-social, a utilização do solo, o aumento da riqueza ou os seguros contra catástrofes, a fim de reduzir, tanto quanto possível, a vulnerabilidade dos recursos hídricos às alterações climáticas.

Deverá ser dada especial atenção às bacias partilhadas entre Portugal e Espanha, sendo de particular importância o desenvolvimento de projectos de cooperação relacionados com os recursos hídricos das bacias hidrográficas internacionais entre Portugal e Espanha. Esta questão deveria ser considerada com relevância particular nos programas de cooperação científica e tecnológica bilateral.

A diminuição prevista do escoamento dos rios do Sul de Portugal até ao final do século, a confirmar-se, poderá ter consequências dramáticas, e constituir, conseqüentemente, uma causa de grande preocupação. Assim, não se afigura que seja sensato ignorar os impactos das alterações climáticas no planeamento e gestão dos recursos hídricos em Portugal.

## 3.8 REFERÊNCIAS

- Aller, L., T. Bennet, J. H. Lehr e J. R. Petty, 1987, DRASTIC: a Standardized System for Evaluating Groundwater Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings, U.S. EPA Report 600/2-85/018, EPA, USA.
- Alves, Maria Helena, J. M. Bernardo, L. Ribeiro e P. Matias, 2002, Contributos para a Determinação do Caudal Ecológico em Portugal Continental, APRH-INAG, Lisboa.
- APDA, 2002, Quem é quem no sector das águas em Portugal. Associação Portuguesa de Distribuição e Drenagem de Água, Lisboa.
- Ayala-Carcedo, F.J., 1996, Reducción de los Recursos Hídricos en España por el Possible Cambio Climático. *Tecnoambiente*, Sep. 1996, Madrid, Espanha.
- Ayala-Carcedo, F.J., 2000, Impactos del Cambio Climático sobre los Recursos Hídricos en España y Viabilidad del Plan Hidrológico Nacional, Madrid, Espanha.
- Ayala-Carcedo, F.J. e Iglesias López, A., 2000, Impactos del Posible Cambio Climático sobre los Recursos Hídricos, el Diseño y la Planificación Hidrológica en la España Peninsular, in El Campo de las Ciencias y las Artes, Servicio de Estudios. Banco Bilbao-Vizcaya-Argentaria, no. 137, Madrid, Espanha, pp. 201-222.
- Bear, J., A. H. Cheng, S. Sorek, Ouazar e I. Herrera (eds.), 1999, Seawater Intrusion In Coastal Aquifers – Concepts, Methods and Practices. Kluwer Academic Publ.
- Bouraoui, F., G. Vachaud, L. Z. X. Li, H. Le Treut e T. Chen, 1999, Evaluation of the impact of climate changes on water storage and groundwater recharge at the watershed scale.
- Carreira, P., 1991, Mecanismos de Salinização dos Aquíferos Costeiros do Algarve (Relatório De Actividades), Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial – Instituto de Ciências e Engenharias Nucleares.
- Condoso de Melo, M.T., 2002, Flow and Transport Modelling of the Aveiro Multilayer Cretaceous Aquifer (Portugal), PhD thesis, Universidade de Aveiro (Portugal).
- Cooper, C.F., W. B. Wilkison e Arnell, 1995, The effect of climate change on aquifer storage and river baseflow, *Hydrological Science J.* 40, 615-631.
- Crawford, N. H. e R. K. Linsley, 1966, *Digital Simulation in Hydrology: Stanford Watershed Model IV*, Stanford University, Dept. of Civil Engineering, Technical report 39.
- Cunha, L. V., 1989, Climate Change and Water Resources Development. In «Berger, A., Schneider, S., Duplessy, J.-C. (Eds.) (1989), Climate and Geosciences. Kluwer Academic, Dordrecht».
- Cunha, L. V., 1993, Recursos hídricos na Europa, in O Jardim Comum Europeu: Novos desafios ambientais. Grupo de Sesimbra e Teresa Ribeiro (Coord.), Quetzal-FLAD.
- Cunha, L. V., R. Oliveira R. e V. B. Nunes, 2002a, Water resources In Climate Change in Portugal. Scenarios, Impacts and Adaptation Measures – SIAM Project, F.D. Santos, K. Forbes and R. Moita (eds.), Gradiva, Lisboa
- Cunha, L. V., R. Oliveira R. e V. B. Nunes, 2002b, Impacto das alterações climáticas nos recursos hídricos Portugueses. *Actas do III Congresso Ibérico sobre Gestão y Planificación del Agua – La Directiva Marco del Agua: realidades y futuros*, 13 p. Sevilha, Espanha, 2002.
- Dill, A. C., M. P. Reis e L. M. Nunes, 2001, Hidrogeologia do aquífero superior (da Península de Tróia), Estudo de Impacte Ambiental da Marina e Novo Cais dos «Ferries» do Tróia Resort, Imoarea S A. Volume II, Anexos, Lisboa.
- ERHSA, 2001, Estudo dos Recursos Hídricos Subterrâneos do Alentejo, Comissão de Coordenação da Região Alentejo.
- Fernández-Carrasco, P., 2000, Estudio del Impacto de un Previsible Cambio Climático sobre los Recursos Hídricos en España. *III Congreso de Ingeniería Civil*, Barcelona, Espanha.
- Fernandez-Carrasco, P., 2002, Estudio del Impacto del Cambio Climático sobre los Recursos Hídricos. Aplicación en Diecinueve Pequeñas Cuencas en España, PhD thesis. E.T.S.I. Caminos Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- Francés, A., E. Paralta, J. Fernandes e L. Ribeiro, 2002, Development and Application in the Alentejo Region of a Method to Assess the Vulnerability of Groundwater to Diffuse Agricultural Pollution: the Susceptibility Index. *3rd International Conference on Future Groundwater Resources at Risk*, ed. Ribeiro L. FGR'01, 35-44, CVRM publ., Lisboa.
- Ghassemi, F., G. Jacobson e A. J. Jakeman, 1991, Major Australian aquifers: potential climate change impacts, *Water International* 16: 38-44.
- Gleick, P. H., 2000, Executive Summary of the Water Sector of the National Assessment of the Potential Consequences of Climate Variability and Change for the U.S. Global Change Research Program, Pacific Institute for Studies in Development, Environment and Security.
- Hewett, B.A.O., C. D. Harries e C. R. Fenn, 1993, Water resource planning in the uncertainty of climate change: a water company perspective, in White R. (ed.), *Engineering for Climate Change*, Thomas Telford, London, 38-54.
- Hirsch, R. M., J. R. Slack e R. A. Smith, 1982, Techniques of Trend Analysis for Monthly Quality Data, *Water Resources Research*, 18(1), pp. 107-121.
- INAG, 1997, Definição, Caracterização e Cartografia dos Sistemas Aquíferos de Portugal Continental, Instituto da Água, Lisboa.
- INAG, 2001, Plano Nacional da Água – Introdução, Caracterização e Diagnóstico da Situação Actual dos Recursos Hídricos. Instituto da Água, vols. 1 e 2, Lisboa.
- IPCC, 2001, Climate Change 2001 – Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- IPCC, 2001, Climate Change 2001, Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II. Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
- Johnson, V. M. e L. L. Rogers, 2000, Accuracy of neural network approximators in simulation-optimization, *Journal of Water Resources Planning and Management-ASCE*, 126(2), 48-56.
- Johnson, V. M. e L. L. Rogers, 2001, Applying soft computing methods to improve the computational tractability of a subsurface simulation-optimization problem, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 29(3-4), 153-175.
- Kendall, M.G., 1975, Rank Correlation Methods, Charles Griffin.
- Kiraly L., 1998, Modeling karst aquifers by combined discrete channel and continuum approach, *Bull. Centre Hydrogéol. Neuchâtel* 16: 77-98.
- Linsley, R. K. e N. H. Crawford, 1960, Computation of a Synthetic Streamflow Record on a Digital Computer, *Int. Association Scientific Hydrology*, Publication 5: 526-538
- LNEC, 2003, Alterações Climáticas e seus Impactos nos Recursos Hídricos Subterrâneos em Ilhas (caso de estudo: Açores), relatório 112/03, Lisboa, 123 pp.
- Loaiciga H.A., D. R. Maidment e J. B. Valdes, 2000, Climate change impacts in a regional karst aquifer, Texas, USA, *Journal of Hydrology* 227(1-4): 173-194.
- Lopes, A.R. e L. Ribeiro, 1996, Desenvolvimento de Um Índice Sintético para a Descrição de Tendências Sazonais em Sucessões Piezométricas. *Actas do Seminário Recursos Hídricos Subterrâneos em Portugal – Quantidade e Qualidade*, APRH e *Actas do 3.º Congresso de Água – Por uma Política de Excelência*, vol. II, 561-572, Lisboa.
- Lourenço C. e L. Ribeiro, 2003, Characterization of Mineral Waters of Pedras Salgadas (North Portugal) by Statistical Methods, *Proc of IAH International Conference on «Groundwater in Fractured Rocks»*, 2 p., Praga, República Checa.

- Mann, H.B., 1945, Non-Parametric Tests Against Trend, *Econometrica* 13: 245-259.
- MMA, 1998, Libro Blanco del Agua en España, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, Espanha.
- MMA, 2002, Plan Hidrológico Nacional, Análise dos Sistemas Hidráulicos, Ministério de Medio Ambiente, Madrid, Espanha.
- Monteiro, J.P., 2001, Characterisation of A Carbonate Aquifer For The Application of A Regional Discrete Continuum Flow Model (Castelo De Vide Carbonate Aquifer – Alentejo, Portugal), PhD Thesis. Neuchâtel Centre of Hydrogeology – CHYN. Switzerland.
- Monteiro J.P., 2002a, Calculation of Equivalent Hydraulic Conductivity as Unknown Variable of a Boundary Value Problem in a Carbonate Aquifer (Castelo de Vide, Portugal), in Ribeiro L. (editor) *FGR'01 – 3rd International Conference on Future Groundwater Resources at Risk*, 235-242, CVRM publ., Lisboa, Portugal.
- Monteiro J.P., 2002b, Interpretation of Pumping Tests and Evaluation of the Order of Magnitude for Hydraulic Parameters Characterising Dissolution Channels in the Castelo de Vide Carbonate Aquifer (Portugal), in Ribeiro L. (editor) *FGR'01 – 3rd International Conference on Future Groundwater Resources at Risk*, 673-680, CVRM publ., Lisbon, Portugal.
- Monteiro, J.P. e L. Ribeiro, 2002, Characterization of a Carbonate Aquifer for the Application of a Regional Discrete Continuum Flow Model. *Acta Universitatis Carolinae – Geologica* 2002, 46 (2/3), 382-386.
- Novo M. E., 2003, Alterações Climáticas e seus Impactos nos Recursos Hídricos Subterrâneos em Ilhas (caso de estudo: Açores). *Seminário sobre Águas Subterrâneas*, APRH, Lisboa, 17 p.
- Nunes, L. M., A. Carvalho-Dill, L. Ribeiro e J. Vieira, 2002, Mixed Analytical and Numerical Modelling of an Oceanic Peninsula Using the Dupuit-Ghyben-Herzberg approach. *Model-CARE2002 – Calibration and Reliability in Groundwater Modelling: A Few Steps Closer to Reality*, eds. K. Kovar & Z. Hrkal, IAHS Publ. n.º 277, 239-246
- Paralta E., M. Oliveira, S. Batista, A. Francês, L. Ribeiro e M. J. Cerejeira, 2001, Aplicação de SIG na Avaliação da Vulnerabilidade Aquífera e Cartografia da Contaminação Agrícola por Pesticidas e Nitratos na Região do Ribatejo. *Actas do Seminário «A Hidroinformática em Portugal»*, ed. CDROM, 16 p., LNEC, Lisboa.
- Parry, M. L., 2000, Assessment of Potential Effects and Adaptations for Climate Change in Europe: The ACACIA Project, Jackson Environment Institute, University of East Anglia.
- Perrochet, P., 1995, Finite hyperelements: a 4D geometrical framework using covariant bases and metric tensors, *Numerical methods in engineering* 11: 525-534.
- Popov, M. e S. He., 2000, Identification of a transient electric dipole over a conducting half space using a simulated annealing algorithm, *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 105(D16), 20821-20831.
- Ribeiro, L., 1994, A Geostatistical-Deterministical Methodology for Evaluating Predictive Uncertainty of Saltwater Intrusion from Leakage. In *GQM 93 – Groundwater Quality Management*, eds. K. Kovar e J. Soveri, IAHS press, publication n.º 220, 271-280.
- Ribeiro, L., 1998, A Geostatistical Characterization of Saline Groundwater Contamination in Areas where Evaporite Domes Occur. *FGR'98 – Proc. of the 2nd International Conference on Future Groundwater Resources at Risk, Technical Documents in Hydrology n.º 27*, International Hydrological Programme, IHP-V, 121-124, UNESCO press.
- Ribeiro, L., 1999, Geostatistical Modelling of Saltwater Aquifer Pollution due to Evaporite Domes Leaching in Maragota Area. In *Proc. of 15th Salt Water Intrusion Meeting (SWIM)*, eds. W. de Breuck e L. Walschot, 80-84, Natuurwetenschappelijk Tijdschrift Publ., Ghent, Belgium.
- Ribeiro, L., 2000, IS – um novo índice de susceptibilidade de aquíferos à contaminação agrícola. Nota interna (não publicada), 12 p., ERSHA-CVCRM.
- Ribeiro, L. e C. Lourenço, 1999, A Study of Trend Analysis on Mineral Waters in the North of Portugal. In *Hydrogeology and Land Use Management*, eds. Fendeková and Fendek, 717-720 Slovak Association of Hydrogeologists Publ.
- Ribeiro, L. e M. E. Macedo, 1995, Application of Multivariate Statistics, Trend- and Cluster Analysis Groundwater Quality in Tejo and Sado Aquifer. In *Proc. of the International Conference on Groundwater Quality: Remediation and Protection*, eds. K. Kovar e J. Krásný, GQ95, Praga, República Checa, IAHS publication n.º 225, 39-47.
- Ribeiro, L. e M. J. Beniel, 2000, Evolução da Qualidade da Água na Captação de Valada – Rio Tejo. *Actas do 5.º Congresso da Água «A Água e o Desenvolvimento Sustentável: Desafios Para o Novo Século»*, ed. CDROM, 9 p., APRH, Lisboa.
- Ribeiro, L., E. Serra, E. Paralta e J. Nascimento, 2003, Nitrate Pollution in Hardrock Formations: Vulnerability and Risk Evaluation by Geomathematical Methods in Serpa-Brinches Aquifer (South Portugal). *Proc. of IAH International Conference on Groundwater in Fractured Rocks*, 2 p., Praga, República Checa.
- Ribeiro, L., M. H. Alves, J. M. Bernardo e P. Matias, 1999, Groundwater Role in the Maintenance of Summer Pools: An Important Issue in Ecological Flow Assessment in Temporary Rivers. *Proc. of 3rd International Symposium on Ecohydraulics*, 3 p., Salt Lake City, USA.
- Ribeiro, L., R. Lopes, F. Rodrigues e C. Cupeto, 1999, Contribuição da Análise de Tendências para a Optimização das Redes de Monitorização Piezométrica dos Sistemas Aquíferos de Portugal – Uma Aplicação ao Subsistema Quaternário de Aveiro. *Recursos Hídricos*, 20 (1), 27-35, APRH, Lisboa.
- Salgueiro, A.R. e L. Ribeiro, 2001, Assessment of Saltwater Intrusion Risk at Mexilhoeira Grande – Portimão Aquifer (Portugal) by Indicator Geostatistics. *Proc. of First International Conference on Saltwater Intrusion and Coastal Aquifers – Monitoring, Modelling, and Management*, ed. CDROM, 11 p., Essaouira, Marrocos.
- Sandstrom, 1995, Modelling the effects of rainfall variability on groundwater recharge in semi-arid – Tanzania, *Nordic Hydrology*, 26(4-5): 313-330.
- Schmidt, J., 2000, Soil Erosion. Application of Physically Based Models, Springer.
- Sen, P.K., 1968, Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's tau, *J. Am. Statist. Assoc.*, pp. 1379-1389.
- Serra, E., 2002, Vulnerabilidade e Risco de Poluição Agrícola no Sistema Aquífero dos Gabros de Beja (Sector da Margem Esquerda do Rio Guadiana), Trabalho final de curso da Licenciatura em Engenharia do Ambiente, IST, Lisboa.
- Serra, E., E. Paralta, L. Ribeiro e J. Nascimento, 2003, Análise Comparativa de Dois Índices de Poluição Agrícola no Sistema Aquífero dos Gabros de Beja (Sector da Margem Esquerda do Rio Guadiana), In *As Águas Subterrâneas no Sul da Península Ibérica*, eds. Ribeiro L. e F. Peixinho de Cristo, APRH publ., Lisboa (in press).
- SIAM, Climate Change in Portugal. Scenarios, Impacts and Adaptation Measures – SIAM Project, 2002, F.D. Santos, K. Forbes and R. Moita (eds.), Gradiva, Lisboa (www.siam.fc.ul.pt).
- Stigter, T., A. Carvalho Dill e L. Ribeiro, 2004, Evaluation of an intrinsic and a specific vulnerability assessment method in comparison with groundwater salinisation and nitrate contamination levels in two agricultural regions in the south of Portugal, submitted to *Journal of Hydrogeology*.
- Stigter, T., J. Vieira e L. Nunes, 2002, Avaliação da Susceptibilidade à Contaminação das Águas Subterrâneas no Apoio à tomada de decisão. Caso de Estudo: Implantação de Campos de Golfe no Concelho de Albufeira (Algarve). *Actas do 6.º Congresso da Água «A Água é d' Ouro»*, ed. CDROM, 12 p., APRH, Porto.

- Theil, H., 1959, A Rank-Invariant method of Linear and Polynomial Regression Regression analysis, 1, 2, 3, Ned. Akad. Wetensch Proc. 1953, pp. 386-392, 521-525 e 1397-1412.
- Vaccaro, J. J., 1992, Sensitivity of groundwater recharge estimates to climate variability and change. Columbia Plateau, Washington, *J. Geophys. Res.* 97, D3, 2821-2833.
- Vrba, J. e A. Zaporozec. (eds.), 1994, Guidebook on mapping groundwater vulnerability. IAH International Contributions to Hydrogeology, 16.
- Wang, M. e C. Zheng, 1998, Ground water management optimization using genetic algorithms and simulated annealing: Formulation and comparison, *Journal of the American Water Resources Association* 34(3), 519-530.
- Wilkinson e Cooper, 1992, The response of idealized aquifer/river systems to climate change, *Hydrological Science* 38, 379-390.
- Younger, P. L., G. Teutsch, E. Custodio, T. Elliot, M. Manzano e M. Sauter, 2002, Assessments of the Sensivity to Climate Change of Flow and Natural Water Quality in Four Major Carbonate Aquifers of Europe», *In Sustainable Groundwater Development*, Geological Society, Special Publications, 193, London.
- Zoppou, C. e M. Reed, 2001, Water distribution network design optimization: Simulated annealing approach – Discussion, *Journal of Water Resources Planning and Management-ASCE* 127(1), 69-70.