

# 9º Seminário sobre Águas Subterrâneas

**Campus de Caparica, 7 e 8 de Março de 2013**  
*Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa*

## Patrocinadores



# 9º Seminário sobre Águas Subterrâneas

Campus de Caparica, 7 e 8 de Março de 2013 | Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

## VARIABILIDADE CLIMÁTICA, RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS E ECOSISTEMAS DEPENDENTES DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

João Paulo LOBO FERREIRA<sup>1</sup>, Teresa E. LEITÃO<sup>2</sup>, Tiago MARTINS<sup>3</sup>, Manuel M. OLIVEIRA<sup>4</sup>, José Paulo MONTEIRO<sup>5</sup>, Maria Emília NOVO<sup>6</sup>

1,2,3,4,6 Núcleo de Águas Subterrâneas, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, 1 Tel. 218 443 609, lferreira@lnec.pt, 2 Tel. 218 443 802, ileitao@lnec.pt, 3 Tel. 218 443 561, tmartins@lnec.pt, 4 218 443 436, moliveira@lnec.pt, 6 Tel. 218 443 538, enovo@lnec.pt,

5 Departamento de Ambiente e Ciências da Terra, Universidade do Algarve, Campus de Gambelas, 8005-139 Faro, 289 800 900, jpmonte@ualg.pt

### RESUMO

Os impactos da variabilidade climática na quantidade e na qualidade dos recursos hídricos podem resultar de efeitos diretos de alterações nas variáveis climáticas, ou indiretos, quando resultam de modificações dos sistemas socioeconómicos induzidas pelas alterações climáticas (cf. Cunha *et al.*, 2006).

Neste artigo apresenta-se uma síntese da análise efetuada em Leitão (2010) sobre os impactos da variabilidade climática nas águas subterrâneas efetuada com base em estudos realizados à escala global (Gleick *et al.*, 2001; IPCC, 2007 e Bates *et al.*, 2008) e nos trabalhos de estudos regionais realizados em Portugal na última década (Nascimento *et al.*, 2004; Nascimento *et al.*, 2005; Cunha *et al.*, 2006; Oliveira *et al.*, 2007; Novo, 2007), dando especial destaque à componente mais recente de avaliação dos impactos da variabilidade climática nos ecossistemas dependentes de águas subterrâneas (EDAS) através da apresentação de resultados de modelação prospetiva de impactos efetuados para o Plano de Gestão de Região Hidrográfica do Tejo – PGRH Tejo (Lobo Ferreira *et al.*, 2012).

**Palavras-chave:** variabilidade climática; recursos hídricos subterrâneos; impactos; ecossistemas dependentes de águas subterrâneas (EDAS)

### DESENVOLVIMENTO

Gleick *et al.* (2001) e Bates *et al.* (2008) descrevem o principal conjunto de efeitos das alterações climáticas no ciclo hidrológico da seguinte forma (expresso através dos elementos precipitação, temperatura e evaporação/evapotranspiração; cf. Figura 1):

- Aumento da temperatura, global e regional;
- Aumento global da média de precipitação, de evaporação e de evapotranspiração;
- Aumento da humidade atmosférica;
- Alterações nos padrões de precipitação, nomeadamente frequência, intensidade e extremos;
- Redução da cobertura de gelo e intensificação do degelo em épocas diferentes;
- Elevação do nível médio da água do mar.

As alterações nestes elementos provocam impactos a diversos níveis que se manifestam no regime de escoamento superficial, *i.e.* período e intensidade dos escoamentos, na recarga e reservas de águas subterrâneas, na humidade do solo, nos ecossistemas dependentes de águas subterrâneas e na subida do nível do mar (também devida ao aumento do volume causado pela expansão térmica da água) que, por sua vez, irão interferir com a capacidade da bacia hidrográfica para reter poluentes ou, pelo contrário, empolar diversas formas de poluição degradando a qualidade das águas subterrâneas (Gleick *et al.*, 2001).

As principais alterações em termos de quantidade de águas subterrâneas advêm de mudanças nos processos de recarga que conduzem a alterações da profundidade ao nível piezométrico e das interfaces entre águas superficiais e águas subterrâneas, com alteração dos caudais de descarga dos aquíferos para os rios (Cunha *et al.*, 2006) e para os EDAS, bem como nas interfaces entre água doce e água salgada em aquíferos costeiros e zonas estuarinas. O aumento dos fenómenos extremos de precipitação, mesmo que para idênticos volumes anuais, pode causar o decréscimo da recarga de águas subterrâneas em virtude da capacidade de infiltração do solo ser excedida com mais frequência, favorecendo o escoamento superficial em detrimento da recarga (Bates *et al.*, 2008). Para quatro cenários de emissões analisados (ECHAM4, HadCM3, GCM RES A2 e GCM RES B2) existem diversos pontos do globo com elevada redução da recarga, onde se incluem os países mediterrânicos (Bates *et al.*, 2008). Os trabalhos realizados sobre a recarga de águas subterrâneas (Oliveira *et al.*,

# 9º Seminário sobre Águas Subterrâneas

Campus de Caparica, 7 e 8 de Março de 2013 | Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

2007) demonstram a influência das séries de distribuição de precipitação na recarga de águas subterrâneas e a necessidade de recorrer a modelos de balanço sequencial diário que tenham em consideração a precipitação diária e a evapotranspiração, bem como a área ocupada pela vegetação e as suas características. Os mesmos autores chegam à conclusão que, para os cenários analisados, um valor de precipitação média de 70% corresponde a 45% da recarga média calculada.

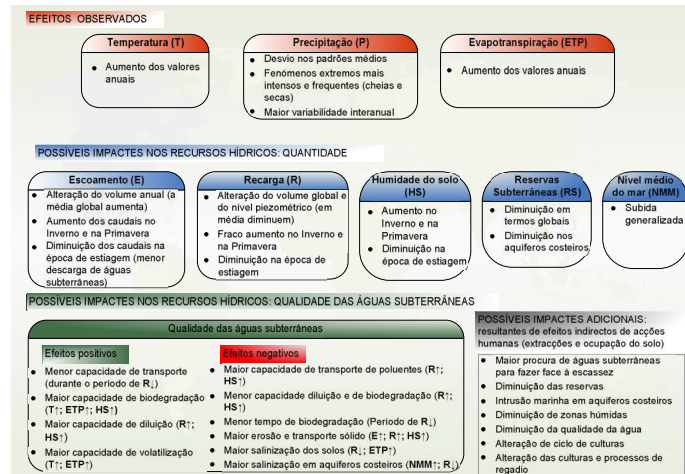


Figura 1 - Principais efeitos das alterações climáticas e seus possíveis impactos nos recursos hídricos (Leitão, 2010)

Relativamente à qualidade das águas subterrâneas, o ligeiro aumento do escoamento superficial e da recarga e de humidade do solo, esperado nalguns anos hidrológicos nos períodos do inverno e primavera, pode ter como efeito negativo o incremento de transporte de poluentes resultantes da maior capacidade erosiva e de transporte. Também o facto do nível piezométrico estar temporariamente mais próximo da superfície do solo favorece o transporte de nutrientes, carbono orgânico dissolvido, patogénicos, pesticidas e sais (entre outros elementos químicos resultantes da ocupação da bacia hidrográfica) para níveis mais profundos, elevando a concentração de poluentes na água e pondo em perigo a saúde humana e dos ecossistemas e a fiabilidade dos sistemas de abastecimento de água. Contrariamente, maiores escoamentos superficiais e recarga em determinados períodos podem aumentar a capacidade de diluição de poluentes e contribuir para uma melhoria da qualidade das águas subterrâneas.

Por outro lado, se o aumento da recarga nalguns períodos pode trazer benefícios e desvantagens para a qualidade das águas subterrâneas, também a diminuição da recarga e da humidade do solo previstas para a época de estiagem o podem (ver Figura 1). Assim, por um lado a redução da recarga e da humidade do solo podem conduzir a efeitos negativos como a redução da capacidade de diluição de poluentes, da sua assimilação por parte do meio poroso envolvente e da capacidade de biodegradação, bem como ao aumento da salinização dos solos quer como resultado da elevada evapotranspiração em solos agrícolas, em especial em zonas áridas e semiáridas, quer como resultado da desestabilização do balanço hídrico em aquíferos costeiros. Há, contudo, um efeito positivo que poderá resultar da diminuição da recarga para períodos mais curtos e que se deve à menor capacidade e tempo de transporte de poluentes a partir da superfície, permitindo assim mais tempo para a sua degradação.

O efeito do aumento da temperatura e da evapotranspiração nem sempre conduz a resultados negativos. De facto, o seu aumento pode ter como consequência um incremento da capacidade de biodegradação e de volatilização de diversos poluentes, nomeadamente de compostos orgânicos e de pesticidas, devido às temperaturas mais elevadas.

Um dos aspetos relevados pela DQA é a atenção particular que é dada ao estabelecimento dos limiares aplicáveis ao bom estado das águas subterrâneas, com base não só na proteção da massa de água, mas também com particular atenção às suas repercussões e à sua inter-relação com as águas de superfície associadas, os ecossistemas terrestres e as zonas húmidas diretamente dependentes. A implicação das alterações climáticas ao nível dos EDAS reveste-se, assim, de particular importância. Nesse contexto, no âmbito do PGRH Tejo (Lobo Ferreira *et al.*, 2012) foi feita a avaliação dos potenciais impactos das alterações climáticas nos EDAS.

A determinação dos impactos nestes ecossistemas foi feita essencialmente por avaliação quantitativa e a metodologia que se apresenta foi aplicada ao sistema aquífero de Monforte – Alter do Chão. A metodologia baseia-se nas modificações das séries climáticas de precipitação, temperatura e evapotranspiração propostas em Oliveira *et al.* (2012), com base nas taxas de variação nos horizontes temporais de 2050 e 2080.

# 9º Seminário sobre Águas Subterrâneas

Campus de Caparica, 7 e 8 de Março de 2013 | Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

As séries climáticas modificadas integraram a corrida do modelo de balanço hídrico sequencial diário BALSEQ\_MOD(Oliveira, 2004, 2006), que atualizou o modelo BALSEQ (Lobo Ferreira, 1981, 1982), obtendo-se os valores de recarga para os referidos horizontes temporais. Considerou-se que as variáveis do meio se mantêm constantes, isto é, mantém-se o conjunto de séries paramétricas da associação solo/ocupação do solo, como na corrida para o cenário de referência atual no período de 1979-2009.

Em geral, a corrida do modelo de balanço hídrico para as séries modificadas resultou em valores de recarga que são inferiores para ambos os horizontes de 2050 e 2080 comparativamente aos obtidos para a situação de referência, consequência da redução da precipitação. Para a área analisada, a recarga para o cenário de 2050 representa em média cerca de 83% da recarga calculada para o período atual utilizando a correção o método de variação constante da precipitação por estação do ano e 88% utilizando o método de variação removendo os eventos menores de precipitação por estação do ano. Para o cenário de 2080 o valor da recarga representa 66% do valor da recarga atual se se utilizar o método de variação constante por estação do ano e 74% utilizando o método de variação removendo os eventos menores de precipitação por estação do ano.

O impacto da diminuição da recarga no sistema aquífero ir-se-á refletir essencialmente numa tendência progressiva de rebaixamento dos níveis piezométricos, verificada através da integração da distribuição espacial dos valores de recarga para os cenários futuros no modelo matemático do sistema aquífero de Monforte – Alter do Chão (Lobo Ferreira *et al.*, 2012). As superfícies piezométricas resultantes do modelo serviram de base para o cálculo da profundidade ao nível piezométrico, por diferença para com a altimetria do modelo digital do terreno, dividindo-se em três zonas: zonas húmidas em que o nível piezométrico (NP) se encontra acima da superfície (Prof. ao NP < 0 m), zonas em que o nível piezométrico se encontra muito próximo da superfície podendo alimentar os ecossistemas (0 m < Prof. ao NP < 1 m), e a restante área (Prof. ao NP > 1 m). O Quadro 1 apresenta as respetivas áreas de ocorrência.

Quadro 1 – Área ocupada por cada zona de profundidade ao nível piezométrico (NP) em função do cenário de alterações climáticas

Cenário	Área (km <sup>2</sup> )			Área total (km <sup>2</sup> )
	(Prof. ao NP < 0 m)	(0 m < Prof. ao NP < 1 m)	(Prof. ao NP > 1 m)	
<b>Atual</b>	0,1475	0,2038	97,5081	
<b>2050 (removendo os eventos menores de precipitação por estação do ano)</b>	0,0550	0,2175	97,5868	
<b>2050 (variação constante por estação do ano)</b>	0,0775	0,2119	97,5700	97,8594
<b>2080 (removendo os eventos menores de precipitação por estação do ano)</b>	0,0162	0,1675	97,6750	
<b>2080 (variação constante por estação do ano)</b>	0,0256	0,1900	97,6436	

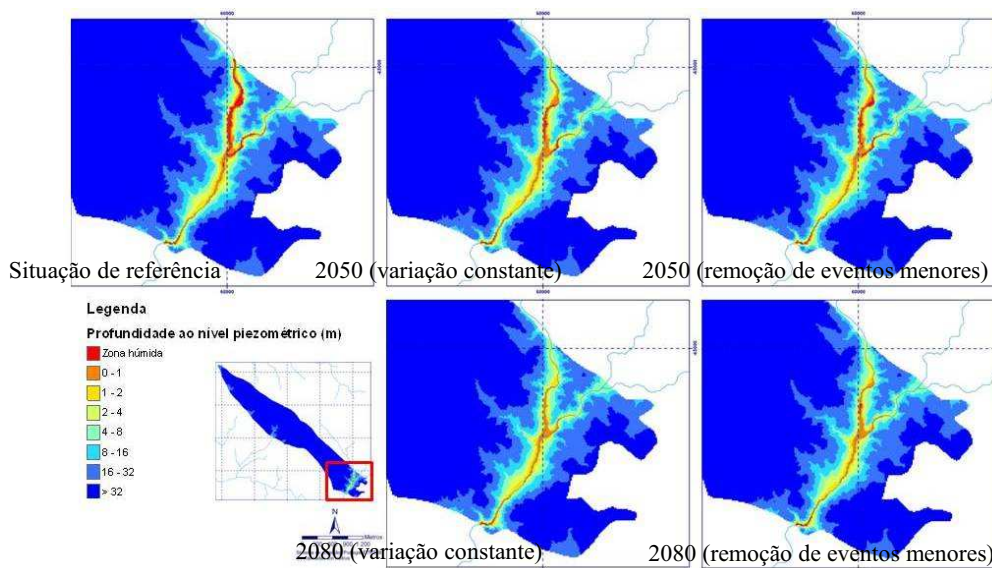


Figura 2–Zonas húmidas e profundidade ao nível piezométrico em cenários de alterações climáticas (adaptado de Lobo Ferreira *et al.*, 2012)



# 9º Seminário sobre Águas Subterrâneas

Campus de Caparica, 7 e 8 de Março de 2013 | Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

A diminuição dos níveis piezométricos em ambos os períodos de análise (2050 e 2080) terá consequências ao nível dos EDAS com uma variação progressiva, segundo os resultados do modelo, das áreas húmidas ou em que o nível está mais próximo da superfície (Figura 2).

Os resultados obtidos variam consoante o método de correção da série de precipitação em cenários de alterações climáticas, observando-se uma diminuição das áreas mais acentuada para o método de variação removendo os eventos menores de precipitação por estação do ano refletindo-se comparativamente à situação de referência numa perda de 63% para 2050 e 89% para 2080 da área de zonas húmidas (Prof. ao NP < 0 m) e num ganho de 4% para 2050 e perda de 7% para 2080 de área na zona de nível próximo da superfície (0 m < Prof. ao NP < 1 m). Para o método variação constante por estação do ano, embora não tão acentuadas, as perdas continuam a ser significativas: 47% em 2050 e 83% em 2080 para zonas húmidas contrabalançado com aumento em 7% em 2050 e perda de 18% em 2080 da área para zonas de nível de água mais próximo da superfície.

## BIBLIOGRAFIA

- BATES, B.C., KUNDZEWICZ, Z., WU, S., e PALUTIKOF, J. (2008). *Climate Change and Water*. Grupo de Trabalho II do Intergovernmental Panel on Climate Change, Secretariado do IPCC, Geneva, 210 pp.
- CUNHA, L.V., RIBEIRO, L., OLIVEIRA, R.P. e NASCIMENTO, J. (2006). *Recursos Hídricos*, in "Alterações Climáticas em Portugal. Cenários, Impactos e Medidas de Adaptação". Projecto SIAM II, eds. F.D. SANTOS e P.MIRANDA, pp. 115-168.
- GLEICK, P.H., SINGH, A. e SHI, H. (2001). *Threats to the World's Freshwater Resources*. Pacific Institute for Studies in Development, Environment, and Security (<http://www.pacinst.org> e <http://www.worldwater.org>), Oakland, California, 59 pp.
- IPCC (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- LEITÃO, T.E. (2010). *Gestão Integrada e Sustentável da Qualidade das Águas Subterrâneas em Portugal. Contributos para um Bom estado em 2015*. Trabalho apresentado para obtenção do Título de Habilitado para o exercício de funções de coordenação de investigação científica, publicado nas Teses e Programas de Investigação do LNEC, TPI 63, ISBN 978-972-49-2191-4, Lisboa, 2010, 346 pp.
- LOBO FERREIRA, J.P. (1981, 1982). *Mathematical Model for the Evaluation of the Recharge of Aquifers in Semiarid Regions with Scarce (Lack) Hydrogeological Data*. Proceedings of Euromech 143/2-4 Setp.1981, Rotterdam, A.A. Balkema (Ed. A. Verruijt e F.B.J. Barends). Também: 1982, Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Memória N° 582.
- LOBO FERREIRA, J. P. C., MONTEIRO, J. P., OLIVEIRA, M. M., MARTINS, T., NOVO, M., OLIVEIRA, L. G. S., LEITÃO, T. E., HENRIQUES, M. J. A. (2012). *Plano de Gestão da Bacia Hidrográfica do Tejo. Modelação do sistema aquífero de Monforte-Alter do Chão e análise dos impactos das alterações climáticas nos ecossistemas dependentes das águas subterrâneas (EDAS)*. Relatório 288/2012 – DHA/NAS, 115 pp.
- MONTEIRO, J. P., NUNES, L., VIEIRA, J., MARTINS, R. R., STIGTER, T., SANTOS, J. (2003). Síntese Bidimensional dos Modelos Conceptuais de Funcionamento Hidráulico de Seis Sistemas Aquíferos do Algarve (Baseada em Modelos Numéricos de Escoamento Regional). Comunicação apresentada em As Águas Subterrâneas no Sul da Península Ibérica, Lisboa.
- NASCIMENTO, J., RIBEIRO, L., CUNHA, L.V. e OLIVEIRA R. (2004). *Impacto das Alterações Climáticas nos Recursos Hídricos Subterrâneos de Portugal Continental. Alguns resultados preliminares*. 7.º Congresso da Água, organizado pela Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, 2004, 15 pp.
- NASCIMENTO, J., RIBEIRO, L., CUNHA, L.V., e OLIVEIRA, R. (2005). *Efeitos das Alterações Climáticas na Disponibilidade Hídrica e na Qualidade da Água Subterrânea da Região Alentejo*. Comunicação apresentada ao 7.º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa, Évora, 16 pp.
- NOVO, M. E. (2007). *Alterações Climáticas e seus Impactos nos Recursos Hídricos Subterrâneos em Ilhas de Pequena Dimensão (Caso de Estudo: Açores – Ilha Terceira)*. Tese de Doutoramento em Engenharia do Ambiente, Angra do Heroísmo, Fevereiro de 2007, 290 pp.
- OLIVEIRA, M.M. (2004, 2006). *Recarga de águas subterrâneas: Métodos de avaliação*. Doutoramento em Geologia (Hidrogeologia), Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências, Departamento de Geologia, 440 pp., 2004. Também: Teses e Programas de Investigação - TPI 42, ISBN 972-49-2093-3, Editora LNEC, 2006.
- OLIVEIRA, M.M., NOVO, M.E., LOBO FERREIRA, J.P. (2007). *Models to predict the impact of the climate changes on aquifer recharge*. In Lobo Ferreira, J.P.; Vieira, J. (eds) – "Water in Celtic Countries: Quantity, Quality and Climate Variability", IAHS Red Books, London, IAHS Publication 310, ISBN 978-1-901502-88-6, pp. 103-110.
- OLIVEIRA, M. M., NOVO, M. E., OLIVEIRA, L.G.S., FERREIRA, J.P. (2012). *Estudo do Impacto das Alterações Climáticas na Recarga do Sistema Aquífero de Torres Vedras*. Comunicação apresentada ao 11º Congresso da Água, Valorizar a Água num Contexto de Incerteza, Porto, 6 a 8 de Fevereiro, 15 pp.