

# Projecto Bingo: O Impacto das Alterações Climáticas na Componente Subterrânea do Ciclo Hidrológico

## *BINGO PROJECT: Impacts of Climate Change on Water Cycle's Groundwater Component*

*Maria Emília Novo<sup>1</sup>, Manuel Oliveira<sup>1</sup>, Tiago Martins<sup>2</sup>, Maria José Henriques<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Investigador auxiliar do LNEC

<sup>2</sup> Bolseiro FCT no LNEC

<sup>3</sup> Técnica superior do LNEC

**RESUMO:** As alterações climáticas causam impactos no ciclo hidrológico e nas disponibilidades hídricas, criando desafios adicionais à gestão integrada e sustentada dos recursos hídricos, nas suas componentes de qualidade, quantidade e suporte dos ecossistemas. As águas subterrâneas sofrem impactos directos das alterações climáticas (via alterações da recarga), ou indirectos (ex.: alterações na recarga vinda dos rios), os quais se conjugam com os devidos às evoluções demográficas, sociais, de uso e ocupação do solo e adaptação no sector da agricultura devido a alterações dos ciclos de vida das culturas e pragas, pragas emergentes ou adopção de novas culturas, com consequente alteração de extracções de águas subterrâneas. Os estudos de alterações climáticas normalmente abarcam um horizonte de 50 a 100 anos, o que dificulta as opções dos decisores, que costumam basear as suas políticas em projecções de curto prazo. O projecto BINGO tenta ultrapassar esta lacuna, fornecendo informação sobre impactos das alterações climáticas no ciclo hidrológico, incluindo os de eventos extremos, para um período de curto-médio prazo (ano 2024). A análise dos impactos das alterações climáticas sobre as águas subterrâneas recorre a um modelo 3D (FEFLOW) dos aquíferos Aluviões do Tejo, Tejo-Margem Direita e Tejo-Sado/Margem Esquerda, com recargas calculadas com modelo de balanço hídrico sequencial diário a nível do solo (BALSEQ\_MOD) a partir dos resultados de 10 realizações climáticas do modelo climático regional MiKlip. Os resultados do MiKlip sugerem cenários de recarga superior e inferior à actual; o ensemble das 10 realizações indica recarga similar à actual. As alterações da recarga sobre a piezometria do aquífero são moderadas, com subidas de 2 a 5 m no cenário de recarga máxima, e descidas de 2 a 10 m no de recarga mínima, e praticamente sem alteração no cenário ensemble das 10 realizações. Analisou-se também o impacto das secas com cenários de duração destas de 3 e 5 anos, considerando as condições do ano muito seco de 2005. Em média, os níveis descem 1 a 2 m no cenário de 3 anos e 2 a 3 m no cenário de 5 anos. Considerando que para o curto prazo, os modelos não mostram mudanças significativas face à actualidade, conclui-se que para acautelar o futuro a longo prazo é necessária uma mudança de paradigma dos decisores, que deverão passar a basear as suas políticas não apenas em previsões de curto prazo, mas sobretudo nas de longo prazo, começando a estabelecer políticas agora, que minorem as consequências das alterações climáticas em 2050 e 2100. Ou seja, agir agora para obter resultados daqui a 3 gerações.

Palavras-chave: alterações climáticas; alterações da recarga; águas subterrâneas; eventos extremos; FEFLOW; BALSEQ\_MOD; sistemas aquíferos do Tejo; modelação numérica

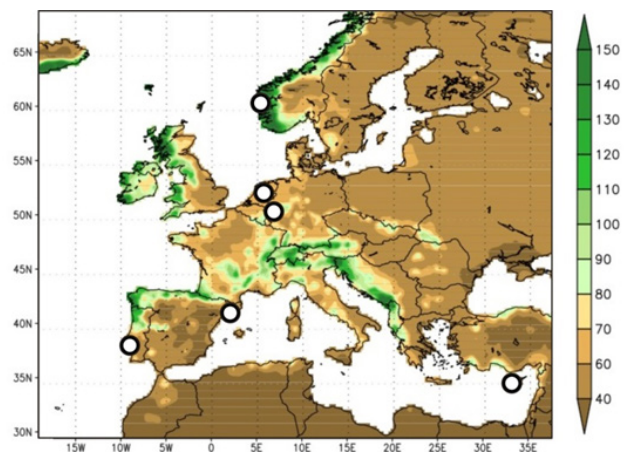
**ABSTRACT:** *Climate change impact groundwater and groundwater resources availability, compounding the challenge of integrated water management, concerning quality, quantity and ecosystems' support. Climate change impacts on groundwater can be direct (due to recharge changes), or indirect (e.g.: changes in recharge from rivers), and couple with those due to demographic, social, land-cover and use changes, and agricultural adaptation strategies due to changes in*

vegetation and pests life cycles, emerging pests or cultivars' changes, which ultimately results in increasing demand of groundwater. Usually climate change studies have a time horizon of 50 to 100 years, which doesn't help decision-makers when they have to set up water management policies, usually based on short term predictions. BINGO project attempted to overcome such hurdle by analysing the impacts of climate change on the water cycle for the short range (time horizon 2024), including those of extreme events. The analysis of such impacts uses a 3D model (FEFLOW) of Aluviões do Tejo, Tejo-Margem Direita & Tejo-Sado/Margem Esquerda aquifers and recharges obtained by using a model that calculates daily sequential water budget in soil (BALSEQ\_MOD) from the 10 realizations of the regional climate model MiKlip. MiKlip results suggest recharge scenarios higher and lower than today's recharge and the ensemble of 10 realizations points to a recharge similar to today's values. Impacts of such recharge changes upon piezometric levels are mild, rising 2 to 5 m in the high recharge scenario, and 2 to 10 m in the low recharge scenario, showing basically a no-change in the scenario resulting from the ensemble of the 10 realizations. Drought impacts have also been analyzed for a 3 and 5 years drought having the same characteristics of the 2005 drought. On average water levels drop 1 to 2 m for the 3-year scenario and 2 to 5 m in the 5-year scenario. Once for short-term, models do not show significant changes from today's conditions, a paradigm shift must occur in order to safeguard the future. Instead of grounding its policies just from predictions for the near future, policymakers must start to look also for the long term predictions to create adaptation policies to be implemented now, to minimize climate change impacts in 2050 and 2100. This means: act now to bear fruits 3 generations ahead.

**Keywords:** climate change; recharge changes; groundwater; extreme events; FEFLOW; BALSEQ\_MOD; Tejo aquifer systems; numerical modelling.

## 1. INTRODUÇÃO

Tradicionalmente, os decisores baseiam as suas políticas em previsões de curto prazo, o que dificulta a implementação de políticas de adaptação às alterações climáticas, que irão trazer inevitáveis mudanças ao funcionamento das sociedades, visto a generalidade dos estudos oferecer projecções para 2050 e 2100. Para ultrapassar este obstáculo, o projecto BINGO, que decorre em 6 países da EU (Figura 1), procura avaliar os impactos das novas condições climáticas médias e eventos extremos (cheias e secas) sobre o ciclo hidrológico para um período de 10 anos (2015-2024), partindo de realizações meteorológicas de curto-médio prazo obtidas pelo modelo climático regional MiKlip desenvolvido pela FUB (Freie Universität Berlin). As realizações do MiKlip fornecem cenários de diferentes variáveis climáticas, os quais se utilizam para averiguar os impactos das alterações das condições climáticas médias, eventos extremos e condições do oceano e estuários sobre as massas de água superficiais e subterrâneas. As projecções climáticas são sobrepostas a cenários de evolução sócio-económica e de uso e ocupação do solo para avaliar os impactos sobre a quantidade e qualidade dos recursos hídricos e realizar a análise do risco de disponibilidade hídrica (não esquecendo as questões de qualidade) nas novas condições climáticas médias e, em particular, em eventos extremos. O objectivo final do estudo é desenvolver, em conjunto com os stakeholders, um *portfolio* de estratégias de adaptação às alterações climáticas, devidamente validadas, tomando em conta as condicionantes sócio-económicas, financeiras e políticas, e assim identificar as de mais fácil implementação.



**Figura 1.** Mapa das zonas de estudo (pontos brancos) e precipitação anual média (mm), 1951-2000 (Fonte: <http://www.projectbingo.eu/> adaptado de IPCC Climatology, Version 2011)

## 2. A COMPONENTE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NO PROJECTO BINGO: O CASO DE ESTUDO PORTUGUÊS

Para estabelecer estratégias robustas de adaptação é necessária a análise integrada dos impactos das alterações climáticas em cada uma das componentes do ciclo hidrológico, o que é realizado pelo projecto BINGO. As águas subterrâneas têm um importante papel no abastecimento, como suporte de ecossistemas e no funcionamento dos cursos de água, em particular os de pequena e média dimensão, e são afectadas por: (1) alterações na recarga, quer pela alteração dos regimes de precipitação e de evapotranspiração potencial quer por mudanças

no coberto vegetal devido a essas alterações ou a mudanças no uso e ocupação do solo; (2) alterações na interação com os cursos de água (por alterações na piezometria e/ou regimes de caudal dos rios); (3) pela subida do nível do mar nas zonas costeiras e estuarinas, e consequente evolução da intrusão salina dos aquíferos. A alteração do regime de secas, em particular se se evoluir para situações de secas plurianuais (cf. Guerreiro et al., 2017) pode causar impactos nos níveis piezométricos e deste modo à disponibilidade de água. As cheias têm também impactos, alguns positivos, na qualidade e quantidade (Mauclair e Gibert, 1998; Masoud et al., 2018; Sun et al., 2016; Gordon, 2016).

Além dos aspectos climáticos directos, as mudanças sócio-económicas, demográficas, de uso e ocupação do solo (eventualmente por adaptação às alterações climáticas; ex.: agricultura) têm também impactos sobre os aquíferos e os consumos. Sendo as águas subterrâneas na região do baixo Tejo uma importante fonte de abastecimento urbano e agrícola, em particular na Margem Esquerda, o caso de estudo português (Figura 2) analisa os impactos sobre os aquíferos, gestão de reservatórios, abastecimento agrícola e urbano, produção hidroeléctrica e funcionamento do estuário do Tejo, incluindo os devidos aos eventos extremos.

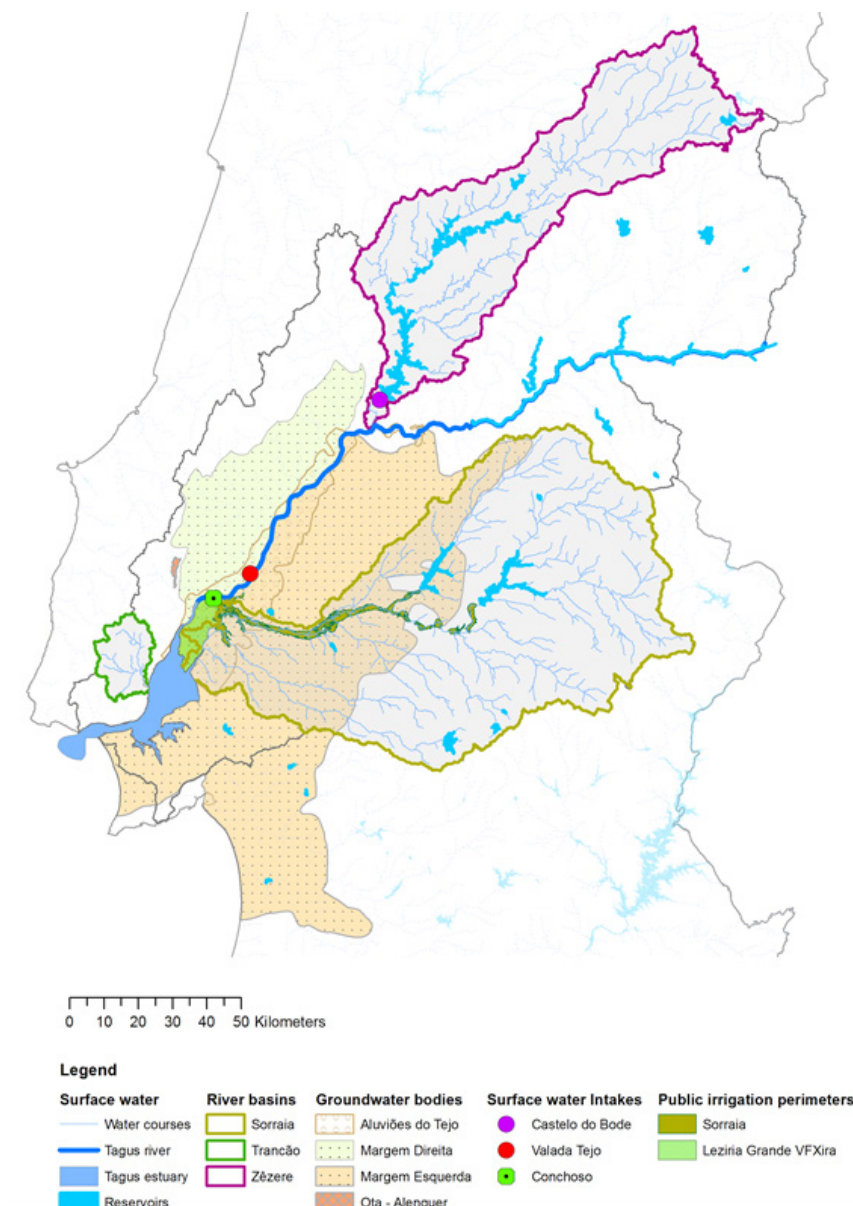


Figura 2. Área do caso de estudo português (Fonte: BINGO Deliverable 3.4)

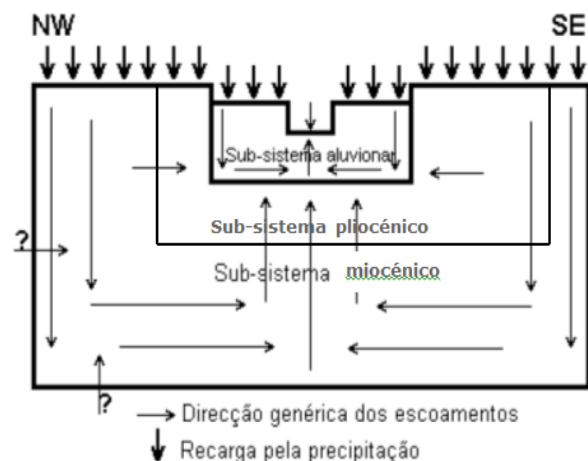
Na componente subterrânea do caso de estudo português analisaram-se os impactos das alterações climáticas sobre 4 aquíferos: Ota-Alenquer, Tejo/Sado-Margem Direita, Aluviões do Tejo e Tejo/Sado-Margem Esquerda (Figura 2). No aquífero Ota-Alenquer avaliaram-se apenas as alterações da recarga para as realizações produzidas pelo modelo climático regional MiKlip. Nos aquíferos Tejo-Sado/Margem Direita, Aluviões do Tejo e Tejo-Sado/Margem Esquerda, analisaram-se os impactos das alterações da recarga sobre a piezometria, visto a informação existente sugerir a ausência de significativas mudanças sócio-económicas ou de uso do solo até 2024. A questão da intrusão salina será analisada em fases posteriores. A análise dos impactos da alteração da recarga, tanto para as condições médias das diferentes realizações climáticas do MiKlip como para cenários de eventos extremos (secas), permitiu, recorrendo ao modelo FEFLOW, identificar as áreas onde a piezometria sofreu as maiores modificações. Tal conhecimento foi usado para apoiar a análise de risco realizada no projecto BINGO e fundamentar as medidas de adaptação a elaborar.

### 3. MODELO CONCEPTUAL DOS AQUÍFEROS DA BACIA DO TEJO-SADO

Conceptualmente considerou-se apenas um único grande aquífero regional, em que os 3 sistemas aquíferos estão hidráulicamente conectados, dada a escassez de dados sobre o comportamento hidráulico da falha do Tejo. Consideraram-se 3 grandes unidades (Figura 3):

- **Aluviões** – representa o aquífero Aluviões do Tejo. É aquífero livre.
- **Pliocénico** – representa as formações pliocénicas dos aquíferos Margem Esquerda e Margem Direita, numa única unidade subjacente às aluviões. É aquífero livre na zona de afloramento e confinado, artesiano, na região confinada.
- **Miocénico** – representa as unidades miocénicas dos aquíferos Margem Esquerda e Margem Direita. É aquífero essencialmente confinado.

Assumiu-se que estas unidades são no geral heterogéneas e isotrópicas, separadas entre si por unidades argilosas que funcionam como aquitardos. Horizontalmente o fluxo natural dá-se dos bordos do aquífero para a rede hidrográfica (o Tejo é a zona de descarga mais importante), estuário e, na zona costeira, para o oceano. Em condições de fluxo



**Figura 3.** Modelo conceptual de funcionamento da massa de águas subterrâneas (adaptado de Mendonça, 2010 in: [https://www.apambiente.pt/\\_zdata/Divulgacao/Publicacoes/Tagides/TAGIDES\\_07%20.pdf](https://www.apambiente.pt/_zdata/Divulgacao/Publicacoes/Tagides/TAGIDES_07%20.pdf))

natural, nas aluviões, a piezometria tende a seguir a superfície topográfica situando-se entre 1 a 5 m abaixo desta, e em continuidade com a piezometria das zonas de afloramento do Pliocénico e Miocénico. Nas zonas confinadas destas duas unidades, a piezometria do Pliocénico situa-se acima da das aluviões e a do Miocénico acima da do Pliocénico. A recarga considerada foi apenas a devida à precipitação visto as perdas por irrigação e da rede de abastecimento doméstico estarem mal contabilizadas na generalidade da área do modelo. A base das camadas foi definida por krigagem com base nos logs de sondagens analisadas por Simões (1998) e a base do modelo foi definida como a da superfície gerada pela base dessas mesmas sondagens, não correspondendo, no geral, à base da série miocénica.

### 4. IMPACTOS DA MODIFICAÇÃO DE SÉRIES CLIMÁTICAS NA RECARGA NATURAL

O cálculo da recarga de águas subterrâneas é feito utilizando o modelo numérico de balanço hídrico sequencial diário BALSEQ\_MOD (Oliveira, 2004). Este modelo faz um balanço hídrico a nível do solo por unidade homogénea de recarga, incorporando metodologias para cálculo, de forma sequencial, dos processos de infiltração no solo, evapotranspiração (real) e infiltração profunda do solo. Tem como antecedentes o modelo BALSEQ desenvolvido por Lobo Ferreira (1981) para a estimativa da recarga de águas subterrâneas na ilha de Porto Santo. A caracterização dos parâmetros das unidades homogéneas de recarga dos sistemas aquíferos do projecto BINGO é apresentada em Oliveira (2018a,b).



Os valores das variáveis meteorológicas utilizadas no modelo (precipitação diária, e valores mensais de temperatura máxima e mínima, humidade relativa média, velocidade do vento média e radiação solar) foram dados pelo modelo Miklip com correcção de viés, produzidos pela equipa da Universidade Livre de Berlim (FUB), cujos procedimentos se encontram sintetizados em Rust et al. (2017).

O impacto da modificação das séries climáticas na recarga de aquíferos é calculado comparando os valores de recarga de águas subterrâneas calculados para cada uma das dez realizações do período 2015-2024 com os valores determinados para as séries históricas utilizadas no Plano de Gestão de Região Hidrográfica do rio Tejo (PGRHT) de 2010 (apresentados em Lobo Ferreira et al., 2011, e sumarizados em Oliveira et al., 2012). A síntese dos valores de recarga é apresentada separadamente para cada sistema aquífero (cf. der Beek et al., 2018) sendo os valores detalhados por unidade homogénea de recarga apresentados em Oliveira (2018b).

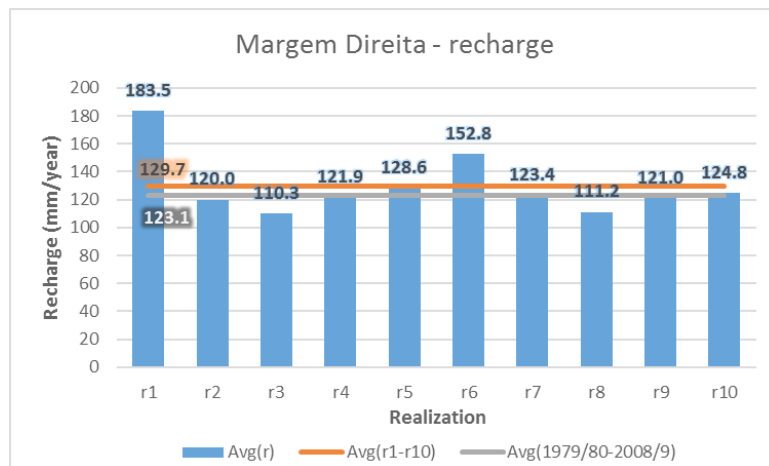
Os valores médios de recarga obtidos para o sistema aquífero da Margem Direita em cada uma das dez realizações são apresentados na Figura 4 [série Avg(r)]. A mesma figura mostra a recarga média calculada para o PGRHT entre 01-10-1979 e 30-09-2009 [série Avg(1979/80-2008/9)] e a média das dez realizações decenais [séries Avg(r1-r10)]. A recarga média varia entre 110 mm/ano (realização 3) e 184 mm/ano (realização 1). O primeiro valor representa -10,4 % da recarga calculada no PGRHT e o segundo valor +49,1 % do que esse valor. A recarga média das dez realizações é de 130 mm/ano. Este valor é ligeiramente mais alto que o da série histórica (123 mm/ano, +5,4 %). Considerando os valores anuais de cada uma das realizações verifica-se que os valores anuais variam significativamente de ano para ano, entre 16 mm/ano e 353 mm/ano. Curiosamente, estes dois valores extremos ocorreram na mesma realização relacionando-se com as precipitações anuais previstas mais baixa (220 mm/ano) e mais alta (1095 mm/ano).

Os valores médios de recarga obtidos para o sistema aquífero da Margem Esquerda em cada uma das dez realizações são apresentados na Figura 5 [série Avg(r)]. A mesma figura mostra a recarga média calculada para o PGRHT entre 01-10-1980 e 30-09-2009 [série Avg(1980/81-2008/9)] e a média das dez realizações decenais [séries Avg(r1-r10)]. A recarga média varia entre 132 mm/ano (realização 3) e 229 mm/ano (realização 1). O primeiro valor representa -20,6 % da recarga calculada no PGRHT e o segundo valor +37,6 % do que esse valor. A recarga média das dez realizações é de 174 mm/ano. Este valor é

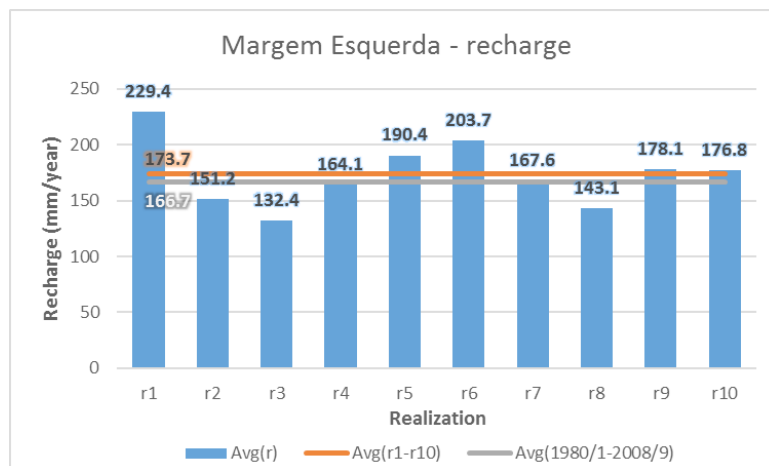
ligeiramente mais alto que o da série histórica (167 mm/ano, +4,2 %). Considerando os valores anuais de cada uma das realizações verifica-se que estes variam significativamente de ano para ano, entre 15 mm/ano e 474 mm/ano. Estes dois valores extremos ocorreram na mesma realização relacionando-se com as precipitações anuais previstas mais baixa (219 mm/ano) e mais alta (1115 mm/ano).

Finalmente, os valores médios de recarga obtidos para o sistema aquífero Aluviões do Tejo em cada uma das dez realizações são apresentados na Figura 6 [série Avg(r)]. A mesma figura mostra a recarga média calculada para o PGRHT entre 01-10-1979 e 30-09-2009 [série Avg(1979/80-2008/9)] e a média das dez realizações decenais [séries Avg(r1-r10)]. A recarga média varia entre 182 mm/ano (realização 3) e 267 mm/ano (realização 1). O primeiro valor representa -11,6 % da recarga calculada no PGRHT e o segundo valor +29,4 % do que esse valor. A recarga média das dez realizações é de 207 mm/ano. Este valor é equivalente ao da série histórica (+0,2 %). Considerando os valores anuais de cada uma das realizações verifica-se que os valores anuais variam significativamente de ano para ano, entre 24 mm/ano e 519 mm/ano. Estes dois valores extremos também ocorreram na mesma realização relacionando-se com as precipitações anuais previstas mais baixa (213 mm/ano) e mais alta (1069 mm/ano).

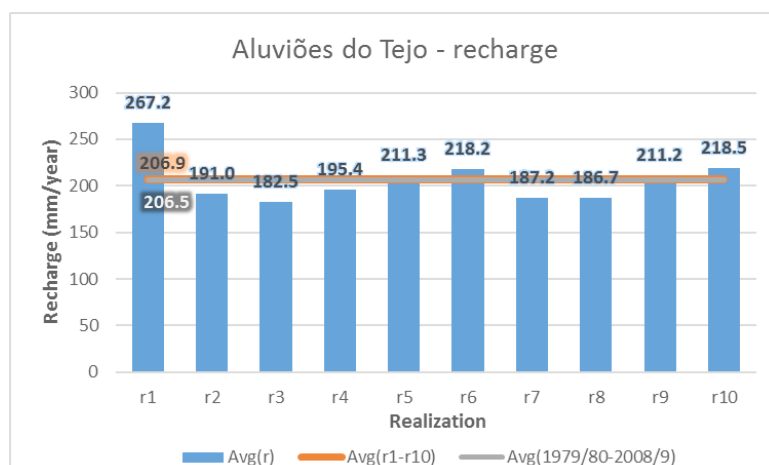
A distribuição espacial da recarga depende das distribuições das precipitações diárias e das evapotranspirações potenciais das plantas/solo, das propriedades dos solos e das propriedades da ocupação do solo. Para se ter uma noção de como a recarga varia em relação aos valores obtidos para o PGRHT, apresenta-se na Figura 7 a relação entre a recarga média das 10 realizações e a recarga calculada no PGRHT, na Figura 8 a relação entre a recarga da realização com valor médio mais baixo (R3) e a recarga calculada no PGRHT, e na Figura 9 a relação entre a recarga da realização com valor médio mais elevado (R1) e a recarga calculada no PGRHT. Em Oliveira (2018) são apresentados os resultados de todas as realizações e combinações de solos/ocupação do solo.



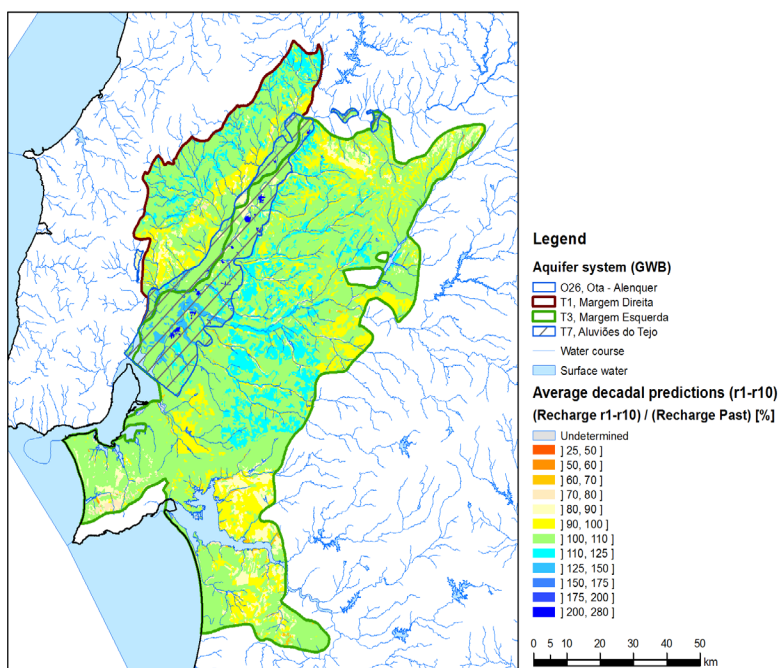
**Figura 4.** Recarga anual média para cada realização do sistema aquífero da Margem Direita.



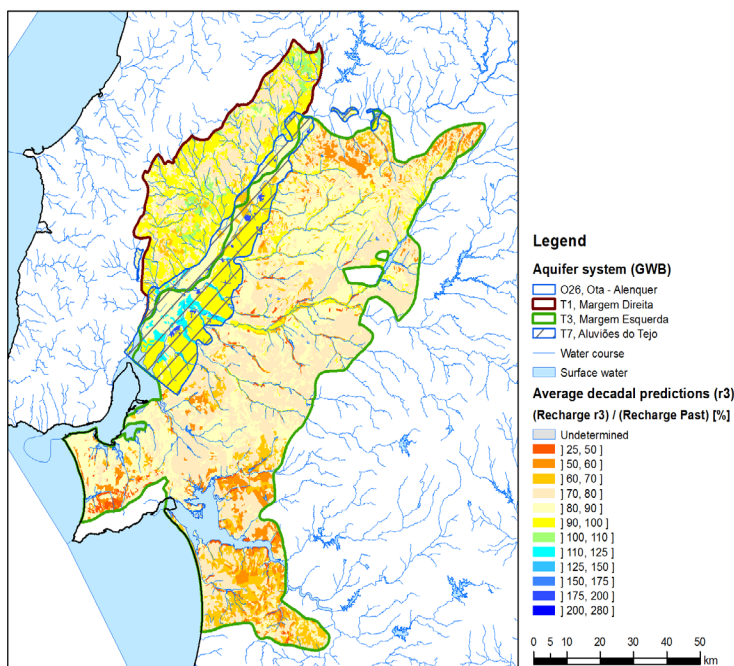
**Figura 5.** Recarga anual média para cada realização do sistema aquífero da Margem Esquerda.



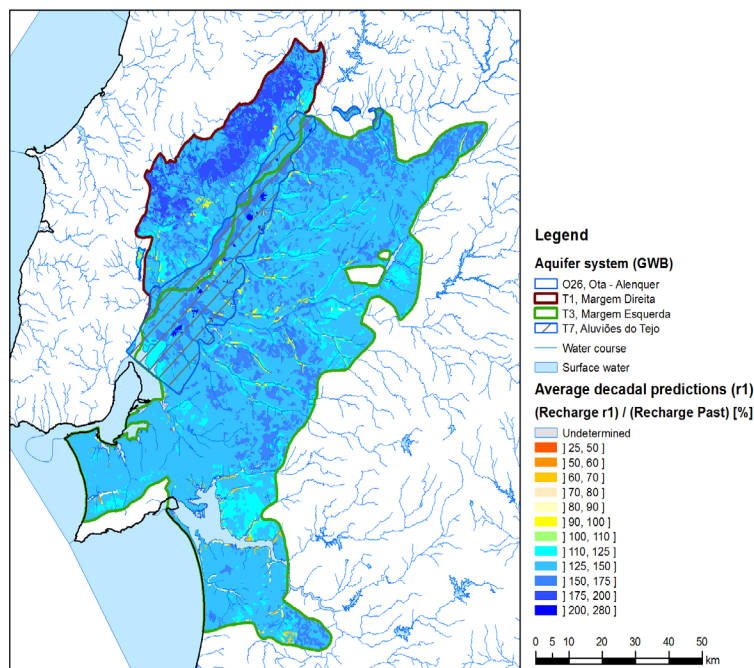
**Figura 6.** Recarga anual média para cada realização do sistema aquífero Aluviões do Tejo.



**Figura 7.** Distribuição da relação entre a recarga anual média das 10 realizações decenais (R1R10) e a recarga anual média do passado.



**Figura 8.** Distribuição da relação entre a recarga anual média da realização com o valor mais baixo de recarga (R3) e a recarga anual média do passado.



**Figura 9.** Distribuição da relação entre a recarga anual média da realização com o valor mais elevado de recarga (R1) e a recarga anual média do passado.

## 5. MODELO NUMÉRICO DE ESCOAMENTO DOS AQUÍFEROS DA BACIA DO TEJO-SADO

Recorreu-se ao modelo FEFLOW (© DHI) – cf. <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/feflow> – para a construção do modelo matemático. O modelo de fluxo, 3D, tem  $8,58 \times 10^9$  m<sup>2</sup> de área,  $1,57 \times 10^{12}$  m<sup>3</sup> de volume, malha triangular com 677 170 nodos e 1 274 500 elementos, onde as 3 unidades aquíferas do modelo conceptual, abaixo descritas, são representadas por 26 slices (25 camadas) por razões de convergência do modelo:

- **Slices 1 a 3** – Aluviões. Slice 1, que representa a superfície topográfica, é definida como Phreatic e as restantes como Dependent, visto o modelo só aceitar 1 única camada como Phreatic.
- **Slices 4 a 6** – Nível argiloso semi-confinante do Pliocénico. Todas Dependent.
- **Slices 7 a 14** – Pliocénico. Todas Dependent.
- **Slices 15 a 17** – Nível argiloso semi-confinante do Miocénico. Todas Confined.
- **Slices 18 a 26** – Miocénico. Todas Confined.

Para a primeira camada admitiu-se o valor de 0,2 m como altura de água residual nas células que venham a secar, as condições fluxo são as de fluxo saturado, admitindo aquíferos não confinados.

Assumiu-se que o nível freático não tem restrições e pode ultrapassar a superfície do terreno, para individualizar eventuais casos de inundação freática.

O modelo tem as seguintes condições de fronteira:

- **Potencial constante  $h = \text{cota do terreno}$**  – representa os rios (e zonas húmidas), devido à impossibilidade de transformar a informação SNIRH em dados adequados para definir condições de fronteira “fluid-transfer”. A rede de drenagem (assim como a topografia) resulta do modelo digital de terreno do Plano de Gestão de Bacia do Tejo de 2011 (APA, 2012), após eliminação dos dados incongruentes.
- **Potencial constante  $h = 0$  m** – define as zonas costeiras por se considerar que a subida do nível do mar e as eventuais alterações no estuário (cf. der Beek et al., 2018) até 2025 não impactam significativamente o fluxo nestas áreas (Figura 10a).
- **Fluxo constante** – aplicado às fronteiras do modelo onde não existe mudança litológica entre o aquífero e as zonas envolventes, pelo que se assume a ocorrência de fluxos do aquífero para o exterior e apenas o inverso na fronteira com a Serra da Arrábida (Figura 10b). Os valores variam (de -0,5 a 5 m/d) de zona para zona do modelo.



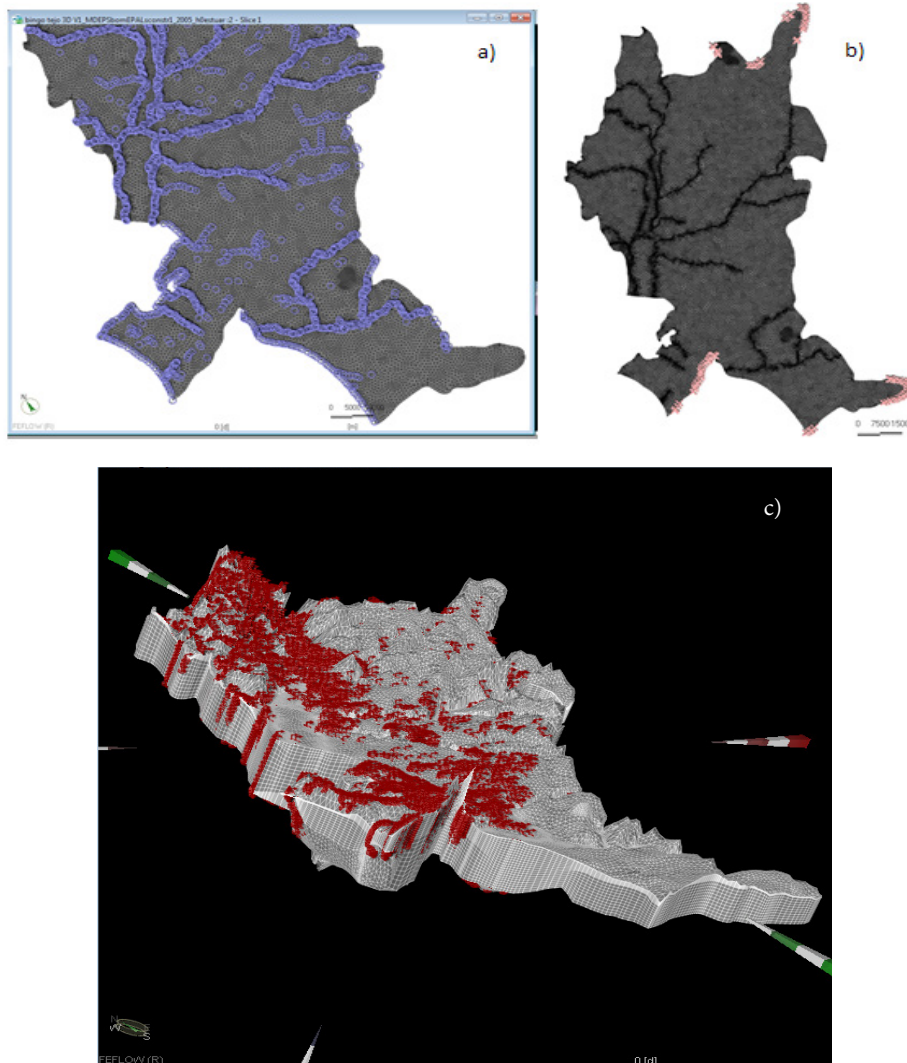
- **Furos multi-layer** – condição de fronteira no FEFLOW que define os furos de captação, todos eles atravessando mais do que 1 slice, num total de 2289 furos. A informação sobre estes furos foi obtida de relatórios de furos da APA, INSAAR, EPAL e CDR-LVT. O total de furos inventariados é superior ao que ocorre no modelo porque foi necessário agregar furos devido ao modelo apenas admitir um furo por elemento da malha (Figura 10c).

A recarga entra no modelo exclusivamente através da 1ª camada, através da opção inflow/outflow on top/bottom. Os valores calculados no PGRHT (Lobo Ferreira et al., 2011) foram utilizados para calibrar o modelo.

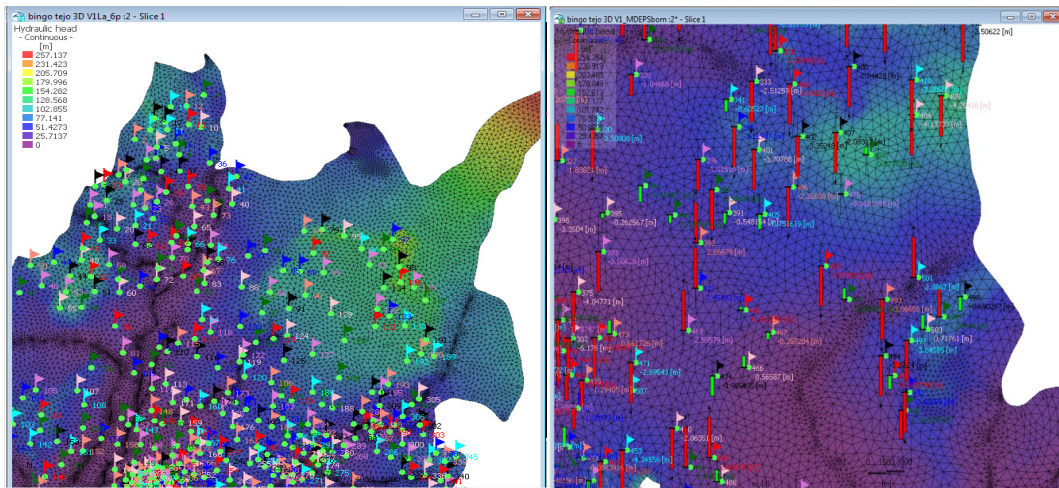
Os parâmetros hidráulicos iniciais definiram-se a partir dos valores apresentados APA, (2012), Lobo Ferreira et al. (2011), Heath (1983).

Para a calibração do modelo foram considerados 501 piezómetros (Figura 11), cujas piezometrias, para o período 1980-2009, provêm da base de dados do Plano de Gestão de Bacia do Tejo de 2011, da base de dados de furos licenciados da CCDR-LVT e da informação obtida durante o estudo para a viabilidade do aeroporto na Ota (Lobo Ferreira et al., 2008).

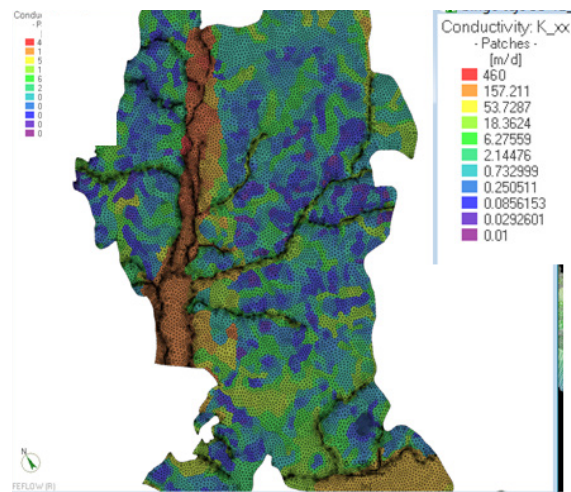
A calibração focou-se na modificação do parâmetro da condutividade hidráulica pois é aquele, a par da recarga, a que o modelo é mais reactivo. A Figura 12 apresenta a distribuição das condutividades após a calibração, tendo-se considerado a condutividade vertical 1/10 da condutividade horizontal, que é idêntica nas direcções xx e yy. Após calibração, a piezometria simulada variava entre 0 e  $\pm 5$  m face à observada nos 501 piezómetros, definindo para a Slice 1 a piezometria da Figura 13.



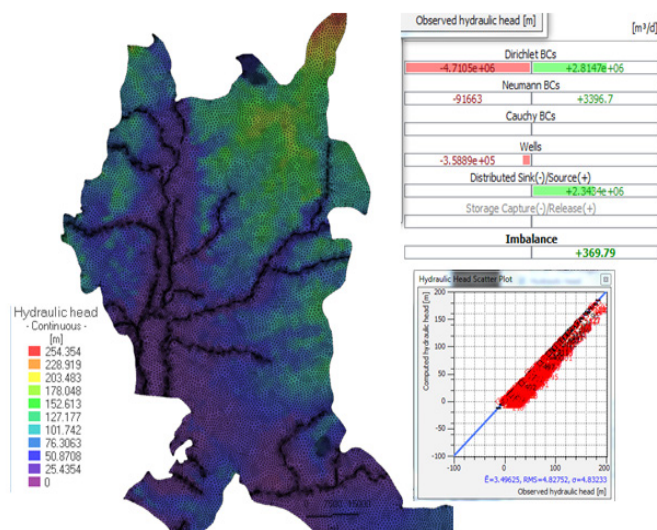
**Figura 10.** Localização das condições de fronteira: a) potencial constante; b) fluxo constante; c) furos multi-layer.



**Figura 11.** Calibração das piezometrias a) pontos de observação; b) erro entre valores observados e simulados (intervalo de erro = 1 m).



**Figura 12.** Distribuição das condutividades hidráulicas após calibração.



**Figura 13.** Superfície piezométrica na Slice 1 após calibração (em condições de bombagem).

## 5. RESULTADOS DA MODELAÇÃO

Após calibração, procedeu-se à modelação das condições de recarga decorrentes dos cenários climáticos fornecidos pelas realizações do MiKlip. Das 10 realizações efectuadas escolheram-se as que originavam: (1) a recarga mais elevada (realização R1), a recarga mais baixa (realização R3) e o ensemble das 10 realizações (R1\_10). Tendo-se verificado que o ensemble das 10 realizações indicava condições de recarga similares às actuais, fez-se a análise apenas para as recargas das realizações R1 e R3. Estas recargas são valores médios anuais para o total da série climática, pelo que se fez a modelação em regime estacionário. Os resultados foram os seguintes para a Slice 1:

### 1. Recarga máxima (29 a 49% > valor actual; Figura 14):

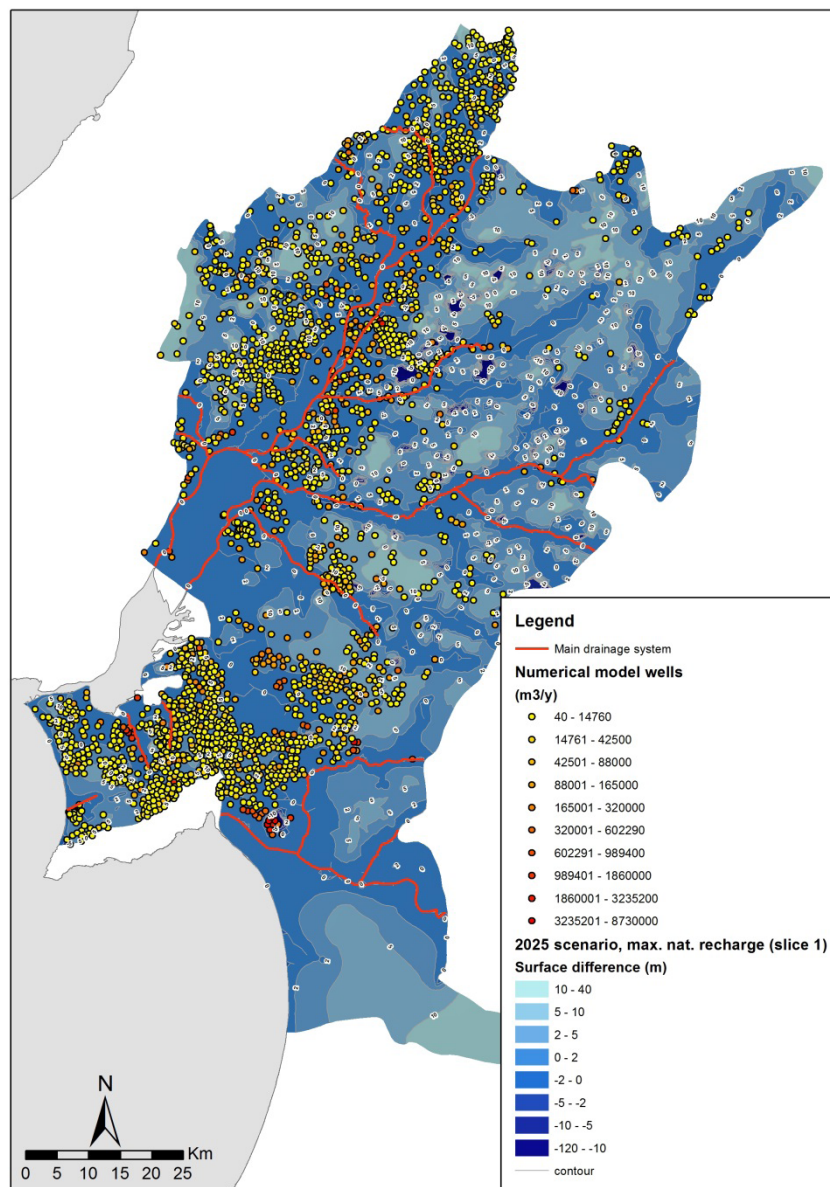
- **Subida dos níveis piezométricos** – zonas baixas: < 2 m; zonas de montante das sub-bacias: até > 5 m; subidas de até 10 m ocorrem em áreas muito localizadas.

- **Várias áreas ficam inundadas.**

### 1. Recarga mínima (10 a 20% < valor actual; Figura 15):

- **Descida dos níveis piezométricos** – nas zonas baixas: até 2 m; zonas de montante das sub-bacias: 2 a 10 m; descidas de > 10 m ocorrem em áreas muito localizadas.

- **Não ocorrem áreas inundadas.**



**Figura 14.** Diferença entre a piezometria média do período 1979-2008) e a piezometria do cenário de recarga mínima (realização R3).

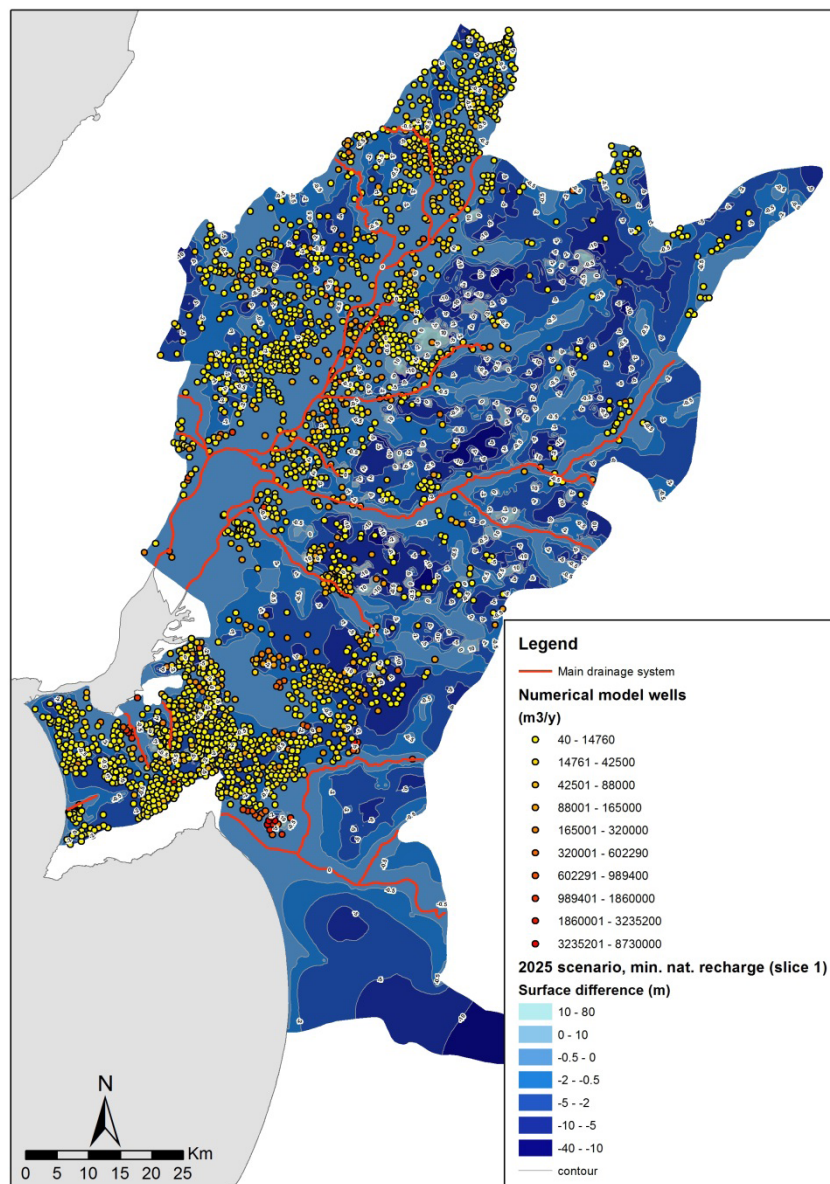


Foram também analisados cenários de seca, adoptando-se as condições de recarga do ano 2005 (< 50% da recarga anual média do período histórico). Fez-se a modelação para regime estacionário e para regime transitório, neste último considerando-se intervalos anuais até um total de 5 anos. Os resultados foram os seguintes:

1. **Regime permanente** (Figura 16): há uma descida média da piezometria  $\approx 20$  m; zona das Aluviões desce 10 a 15 m; pontualmente há descidas de 20 a 40 m ou mesmo 60 m.
2. **Regime transitório**: reflecte situações de

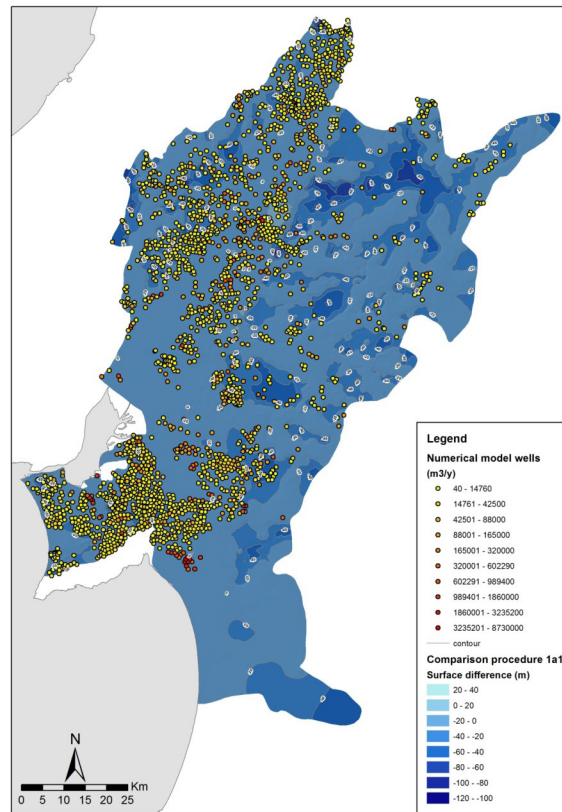
seca plurianuais, até 5 anos de duração (Figura 17).

- **1 ano de seca** – há uma descida média de 1 m; zonas baixas desce < 0,5 m; pontualmente podem ocorrer descidas de até 5 m.
- **3 anos de seca** – a descida média é de 1 a 2 m; pontualmente há descidas de 3 a > 5 m.
- **5 anos de seca** – a descida média **é de 2 a 3 m**; pontualmente desce > 5 m.

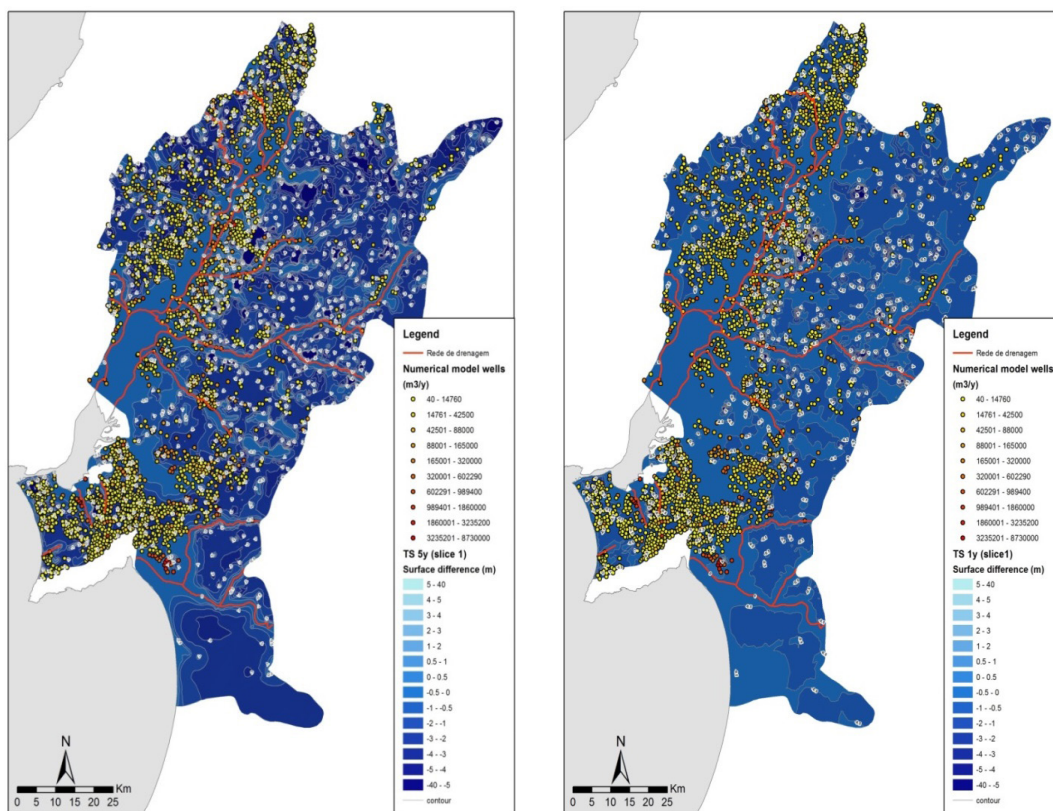


**Figura 15.** Diferença entre a piezometria média do período 1979-2008 e a piezometria do cenário de recarga máxima (realização R1).





**Figura 16.** Diferença entre a piezometria média do período 1979-2008 e a piezometria do cenário de seca (ano de 2005) em regime permanente.



**Figura 17.** Diferença entre a piezometria média do período 1979-2008 e a piezometria do cenário de seca (ano de 2005) em regime transitório: a) 1º ano de seca; b) 5º ano de seca consecutiva.

## 6. CONCLUSÕES

Na análise de resultados deve-se ter a noção que há fontes de incerteza nos modelos numéricos utilizados para calcular as séries climáticas, a recarga, e o escoamento subterrâneo, como sejam: a metodologia de correcção de viés utilizada para gerar as previsões decenais, os parâmetros derivados dos solos e da ocupação do solo necessários para correr o modelo de recarga, a aptidão deste modelo numérico para reproduzir o processo de recarga de aquífero, a dificuldade em calibrar o modelo de escoamento e, finalmente, a dificuldade em validar os resultados dos modelos numéricos, fundamentalmente em processo de avaliação de cenários. Cientes dos aspectos referidos apresentam-se as conclusões deste trabalho.

Os três sistemas aquíferos do Baixo Tejo (Margem Direita, Margem Esquerda e Aluviões do Tejo) são reservatórios de porosidade intergranular com elevada capacidade de armazenamento que regula eventos episódicos de baixa ou elevada recarga, mesmo que de período anual ou superior. Esta característica significa que em termos de recarga de águas subterrâneas o parâmetro mais importante é a recarga média anual a longo termo.

No caso de as previsões decenais implicarem uma mudança na recarga média anual a longo termo (considerada a média dos nove anos hidrológicos em estudo – outubro de 2015 a setembro de 2024) em relação ao passado (a recarga média da série histórica calculada no PGRHT), esta mudança pode representar um aumento dos recursos hídricos subterrâneos (no caso de subida) ou uma diminuição destes recursos (no caso de descida), embora este não seja um processo linear.

Considerando a média das 10 realizações decenais, calculou-se um pequeno aumento da recarga de 6-7 mm/ano nos sistemas aquíferos Margem Direita e Margem Esquerda, e um valor aproximadamente igual no sistema aquífero Aluviões do Tejo.

Como apontado pelos autores das previsões decenais, a previsão mais precisa estará na média do ensemble (Rust et al., 2017). Contudo, para ter em conta a incerteza inerente nas condições iniciais do sistema climático utilizado para correr o modelo climático que gera as previsões decenais, cada realização é considerada tão provável como as restantes e assim, baseados nestes resultados, as partes interessadas e a sociedade em geral deveriam estar preparados para qualquer um dos cenários futuros, quer de subida da recarga de águas subterrâneas, que teria em termos de disponibilidade hídrica um impacto positivo, quer de descida da recarga em relação aos valores históricos, que teria um impacto negativo.

Pode-se considerar com base nos resultados obtidos que o ensemble das 10 realizações do MiKlip fornece condições de recarga semelhantes às actuais, sugerindo que a recarga talvez não se altere significativamente neste curto espaço temporal. Considerando a realização que gera a máxima recarga (R1) e a realização que gera a recarga mínima (R3), simularam-se as alterações para cada um destes 2 casos, verificando-se que no geral o impacto é moderado nas zonas baixas e centrais do modelo, com respectivamente subidas ou descidas da piezometria de até 2 m, mas localmente as variações podem ser muito superiores. No caso do cenário de recarga máxima, várias zonas deprimidas tendem a ficar inundadas por subida dos níveis de água.

A análise dos impactos das secas fez-se criando cenários com condições de recarga iguais às de 2005. No cenário em regime estacionário (assume que as condições climáticas médias passam a ser as do ano 2005), assiste-se a uma descida muito acentuada da piezometria, com valores médios de 20 m mas em vários locais são muito superiores. Nos cenários transitórios verificou-se uma descida continuada da piezometria à medida que a duração da seca aumenta, passando de 1 a 3 m, em média, entre 1 e 5 anos de seca, mas com várias zonas com descidas superiores a 5 m, no caso da seca mais longa.

Os resultados para secas de duração de 1 ano parecem ser optimistas face a observações pontuais no terreno, sugerindo que para eventuais ocorrências de cenários de secas pluri- anuais os resultados do modelo sejam também optimistas. No entanto, tal tipo de situação ainda não ocorreu, pelo que não é possível validar o modelo para esta situação. Os resultados nas condições médias climáticas de recarga máxima (R1) e mínima (R3) revelam áreas localizadas do modelo a precisar de refinamento dos parâmetros hidráulicos, o que exige informação de pormenor ainda desconhecida. Sendo que os resultados das realizações climáticas sugerem alterações pouco significativas até 2024, mas que estas se irão acentuar ao longo do século, os decisores têm de mudar de abordagem e passar a basear as suas políticas de adaptação não apenas em dados de curto prazo mas também nos de longo prazo, e começar a agir agora para obter resultados algumas décadas mais tarde, sob risco de, agindo sempre em curto-prazo, quando se chegar a 2050 o que se tiver feito de adaptação seja notoriamente insuficiente.

## AGRADECIMENTOS

O Projecto BINGO (<http://www.projectbingo.eu/>) é financiado pela União Europeia através do programa Horizonte 2020, contrato nº 641739, sendo coordenado pelo LNEC.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[http://www.arhtejo.pt/c/document\\_library/get\\_file?uuid=e5a4e269-88f5-440c-88d3-28cf40c218b7&groupId=10225](http://www.arhtejo.pt/c/document_library/get_file?uuid=e5a4e269-88f5-440c-88d3-28cf40c218b7&groupId=10225) (acedido a 20/5/2018).

<https://www.mikepoweredbydhi.com/products/feflow>

<http://www.projectbingo.eu/> (acedido a 10/8/2018).

<http://www.projectbingo.eu/research-sites> (acedido a 27/1/2017).

APA (2012). Plano de Gestão da Região Hidrográfica do Tejo. Relatório Técnico. Lisboa. [http://sniamb.apambiente.pt/infos/geoportaldocs/Planos/PGRH5-TEJO/RelatorioTecnico\\_CE%5C2\\_PGRH5-TEJO/RelatorioTecnico\\_CE%5C2\\_PGRH5-TEJO/RelatorioTecnico\\_CE%5C2\\_PGRH5-TEJO\\_Rel\\_CE\\_FD.pdf](http://sniamb.apambiente.pt/infos/geoportaldocs/Planos/PGRH5-TEJO/RelatorioTecnico_CE%5C2_PGRH5-TEJO/RelatorioTecnico_CE%5C2_PGRH5-TEJO_Rel_CE_FD.pdf) (acedido a 27/6/2017).

der Beek, T., Alves, E., Becker, R., Bruggeman, A., Fortunato, A.B., Freire, P., Gagne, A., van Huijgevoort, M.H.J., Iacovides, A., Iacovides, I., Kristvik, E., Locatelli, L., Lorza, P., Mouskoundis, M., Muthanna, T., Nottebohm, M., Novo, E., Oliveira, M., Rijpkema, S., Rodrigues, M., Russo, B., Scheibel, M., Sunyer, D., Teneketzi, E., Vayanou, P., Viseu, T., Voortman, B.R., Witte, J.P.M. (2018) Project BINGO – D3.4 Model results for water and land use scenarios completed and analysed. In: [http://www.projectbingo.eu/downloads/BINGO\\_Deliverable3.4\\_final.pdf](http://www.projectbingo.eu/downloads/BINGO_Deliverable3.4_final.pdf) (acedido a 14/8/2018).

Gordon, S. (2016) How Heavy Flooding Can Damage Drinking Water Quality Northwest Wisconsin Deluge Should Put Well Owners on Alert for Contamination. WisContext. Series: Drinking Water Quality. In: <https://www.wiscontext.org/how-heavy-flooding-can-damage-drinking-water-quality> (acedido a 10/8/2018).

Guerreiro, S.B., Kilsby, C., Fowler, H.J. (2017) Assessing the threat of future megadrought in Iberia. International Journal of Climatology Volume 37, Issue 15, December 2017, pp. 5024–5034, DOI: 10.1002/joc.5140. In: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.5140/full> (acedido a 12/12/2017).

Heath, R.C. (1983). Basic ground-water hydrology, U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2220,

pp. 86. In: [http://www.aqtesolv.com/aquifer-tests/aquifer\\_properties.htm](http://www.aqtesolv.com/aquifer-tests/aquifer_properties.htm) (acedido a 13/2/2017).

Lobo Ferreira J.P. (1981). “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.º 582.

Lobo Ferreira, J.P., Oliveira, M.M., Leitão, T. (2008) Análise técnica comparada das alternativas de localização do novo aeroporto de Lisboa na zona da Ota e na zona do campo de tiro de Alcochete. Relatório LNEC 28/2008, Lisboa.

Lobo Ferreira, J.P., Vaz Pinto, I., Monteiro, J.P., Oliveira, M.M., Leitão, T.E., Nunes, L., Novo, M.E., Salvador, N., Pombo, S., Silva, M.F., Igreja, A., Fernandes Nunes, J., Henriques, M.J., Silva, D., Oliveira, L., Martins, T., Martins, R., Monte, M., Martins, J., Braceiro, A., Henriques, R.S., Quaresma, M. (2011). Plano de gestão da região hidrográfica do Tejo. Lote 2, 1.ª Fase, Segunda Versão dos Conteúdos do PGRH Tejo. Versão 2. Relatório Hidroprojecto-LNEC-ICCE, PGRH Tejo, Lisboa.

Masoud, M.H.Z., Basahi, J.M., Rajmohan, N. (2018) Impact of flash flood recharge on ground-water quality and its suitability in the Wadi Baysh Basin, Western Saudi Arabia: an integrated approach. Environmental Earth Sciences 77:395, pp. 19. In: <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7578-0> (acedido a 10/8/2018).

Mauclair, L., Gibert, J. (1998) Effects of pumping and floods on groundwater quality: a case study of the Grand Gravier well field (Rhône, France). Hydrobiologia 389: pp. 141–151. In: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1023%2FA%3A1003566101271.pdf> (acedido a 10/8/2018).

Mendonça, J.L. (2010). Caracterização geológica e Hidrogeológica da bacia terciária do Tejo-Sado. Tágides – Os Aquíferos das Bacias Hidrográficas do Rio Tejo e das Ribeiras do Oeste. in: [https://www.apambiente.pt/\\_zdata/Divulgacao/Publicacoes/Tagides/TAGIDES\\_07%20.pdf](https://www.apambiente.pt/_zdata/Divulgacao/Publicacoes/Tagides/TAGIDES_07%20.pdf)

Oliveira M.M. (2004). 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., Martins, T.A., Lobo Ferreira, J.P. (2012). Avaliação da recarga dos sistemas aquíferos abrangidos pelas regiões hidrográficas do Vouga, Mondego, Lis, Ribeiros do Oeste e Tejo. Comunicação ao 11º Congresso da Água, APRH, Publicação em CD-ROM, Palácio Hotel, Porto, 6 a 8 de fevereiro de 2012, 15 pp.
- Oliveira, M.M. (2018a). Projeto BINGO: a estimativa da recarga de quatro sistemas aquíferos do baixo Tejo para o período 2015-2024. Comunicação ao 14.º Congresso da Água, APRH, Publicação em pen drive, Évora Hotel, Évora, 7 a 9 de março de 2018, 22 pp.
- Oliveira, M.M. (2018b). BINGO project: Impact of climate change for the period 2015-2024 on the recharge of Margem Direita, Margem Esquerda, Aluviões do Tejo and Ota-Alenquer aquifer systems. LNEC report under preparation.
- Rust, H.W., Richling, A., Meredith, E., Fischer, M., Vagenas, C., Kpogo-Nuwoklo, K.A., Kadow, C., Ulbrich, U. (2017). DECO - A plug-in for data extraction and conversion developed within and for BINGO. Freie Universität Berlin, Version from December 8, 2017.
- Simões, M.M.M. (1998). Contribuição para o Conhecimento Hidrogeológico do Cenozóico na Bacia do Baixo Tejo. Vols. I e II. Tese de Doutoramento Universidade Nova de Lisboa, Monte da Caparica, 310 p.
- SNIRH <http://snirh.apambiente.pt/index.php?idMain=1&idItem=1.4&uh=T> (acedido a 27/1/2017).
- Sun, R., An, D., Lu, W., Shi, Y., Wang, L., Zhang, C., Zhang, P., Qi, H., Wang, Q. (2016) Impacts of a flash flood on drinking water quality: case study of areas most affected by the 2012 Beijing flood. Heliyon, pp. 14. In: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844015305259> (acedido a 10/8/2018).