



## PROJECTO BINGO: ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS E A COMPONENTE SUBTERRÂNEA DO CICLO HIDROLÓGICO

Maria Emília, NOVO<sup>1</sup>; Maria José, HENRIQUES<sup>2</sup>

<sup>1</sup> \*\* Investigadora Auxiliar, LNEC, Av. Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, [enovo@lnec.pt](mailto:enovo@lnec.pt), Tel. 218 443 538

<sup>2</sup> Técnica Superior de Experimentação, LNEC, Av. Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, [mjhenriques@lnec.pt](mailto:mjhenriques@lnec.pt), Tel. 218 443 443

### Resumo

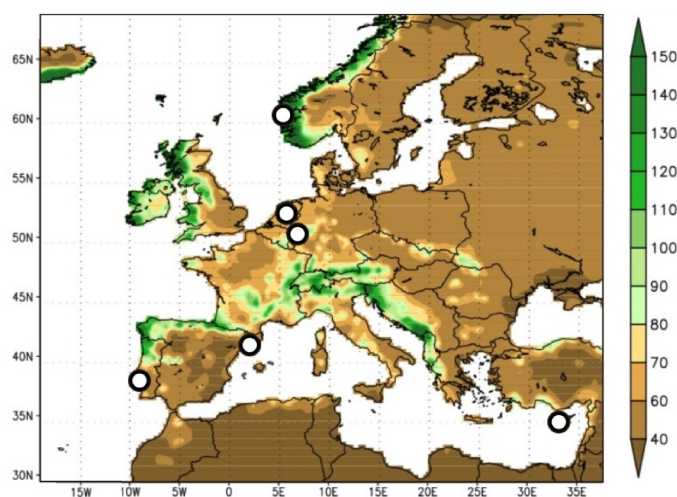
As alterações climáticas causam impactos no ciclo hidrológico e nas disponibilidades hídricas, criando desafios adicionais à gestão integrada e sustentada dos recursos hídricos, nas suas componentes de qualidade, quantidade e suporte dos ecossistemas. As águas subterrâneas não estão imunes aos impactos das alterações climáticas, que se conjugam ainda com os devidos às alterações demográficas, sociais e de uso e ocupação do solo. 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 de gestão da água em dados e projecções de curto prazo. O projecto BINGO tenta ultrapassar esta lacuna, fornecendo informação sobre os impactos das alterações climáticas sobre o ciclo hidrológico, incluindo os devidos a eventos extremos, para períodos de curto-médio prazo. A análise dos impactos das alterações climáticas sobre as águas subterrâneas recorre a 1 modelo matemático 3D englobando os aquíferos Aluviões do Tejo, Tejo-Margem Direita e Tejo-Sado/Margem Esquerda, usando recargas calculadas a partir dos resultados de projecções climáticas dos modelos climáticos regionais para a Europa. O impacto das alterações do nível do mar sobre intrusão salina é também analisado por modelos “density-dependent” nas bordaduras estuarinas-costeiras destes aquíferos, recorrendo a projecções das alterações do nível do mar e respectivo avanço sobre o continente obtidas de modelos costeiros, como dados de entrada do modelo. Os resultados da modelação serão usados para análise de risco (sobretudo quanto ao abastecimento) e fundamentar as soluções de adaptação a ser propostas. Até ao momento, foi obtida a calibração do modelo de fluxo para as condições naturais.

**Palavras-chave:** alterações climáticas; águas subterrâneas; gestão integrada dos recursos hídricos; eventos extremos (secas); FEFLOW

**Tema:** Água, território e adaptação à variabilidade climática.

## 1. INTRODUÇÃO

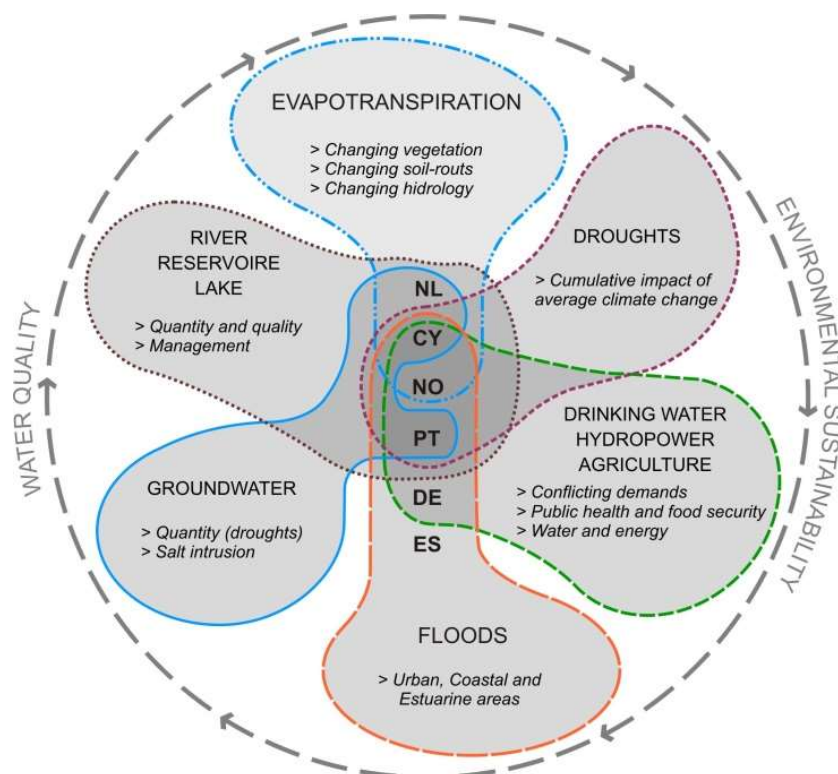
Embora a generalidade dos estudos sobre alterações climáticas apresentem resultados para horizontes temporais de 50 a 100 anos, o facto das consequências destas alterações serem projectadas para esses horizontes temporais, exige que a mitigação e adaptação comece a ser realizada agora para evitar precisamente tais consequências. No entanto esta situação é um obstáculo para os decisores, visto ser tradicionalmente difícil para eles implementar políticas, em particular na área da adaptação, com as suas consequentes alterações de funcionamento da sociedade, com base em projecções de algo que acontecerá daqui a 100 anos. Tal mudança de paradigma é necessária e devendo passar-se a pensar em termos de longo prazo mas na fase actual este tipo de estudos pouco apoio garante à implementação de políticas por parte dos decisores quando têm de lidar com enquadramentos políticos de curto prazo. Para obviar a este facto, o projecto BINGO (<http://www.projectbingo.eu/>), um projecto do Horizonte 2020, procura avaliar os impactos (cumulados e de eventos extremos) das alterações climáticas sobre o ciclo hidrológico, nas suas componentes de qualidade e quantidade para um período de 10 anos, partindo de projecções meteorológicas de curto-médio prazo mais fiáveis obtidas por modelos climáticos regionais, em que se incluem as projecções relativas a eventos extremos (cheias e secas). Esta informação permite assim, a análise da variabilidade hidrológica e respectivos impactos sobre as interacções entre águas superficiais e subterrâneas e a influência do meio marinho, em condições de alteração do nível do mar, nos ambientes fluviais e costeiros. A estes dados climáticos e hidrológicos acrescentam-se cenários de evolução sócio-económica e de uso e ocupação do solo de modo a avaliar não apenas os impactos sobre a quantidade e qualidade do recurso hídrico (superficial e subterrâneo) mas também realizar uma análise do risco ao nível da disponibilidade hídrica (não esquecendo as questões de qualidade associadas) quer em condições medianas quer em situações de cheia ou seca. O objectivo final do estudo é desenvolver, em conjunto com os stakeholders, um portfolio de estratégias de adaptação às alterações climáticas, devidamente validadas, entrando em consideração com os factores sócio-económicos, financeiros e políticas que as condicionam, de modo a identificar as demais fácil implementação. Este projecto desenvolve-se em 6 países da EU (Figura 1).



**Figura 1.** Mapa precipitação anual média (mm/month), 1951-2000, e das zonas de estudo (pontos brancos) dos 6 países do projecto BINGO (Fonte: <http://www.projectbingo.eu/> adaptado de GPCC Climatology, Version 2011)

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

Para analisar de forma integrada os impactos das alterações climáticas no ciclo hidrológico é necessário avaliar os impactos destas alterações em cada uma das suas componentes, se se pretender definir estratégias de adaptação robustas e adaptáveis às variações dos sistemas naturais que condicionam o ciclo hidrológico (Figura 2).

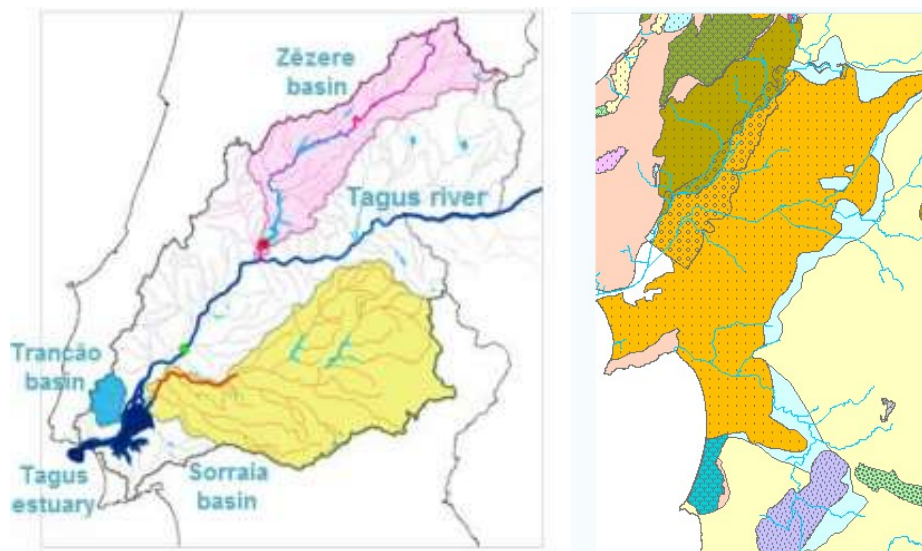


**Figura 2.** Conjunto de processos e condicionantes do ciclo hidroógico, usos estratégicos e problemas chave analisados no Projecto BINGO (Fonte: <http://www.projectbingo.eu/research-sites>)

Sendo as águas subterrâneas parte integrante do ciclo hidrológico, a análise dos impactos das alterações climáticas deverá ter em atenção estes mesmos processos: alterações na recarga, na evapotranspiração (por resposta das comunidades vegetais naturais às alterações climáticas ou, e com maior influência na generalidade dos territórios humanizados, alterações do uso do solo, derivadas ou não das adaptações a estas alterações), nas interações com a rede hidrográfica, em particular em contexto de secas, embora questões de qualidade possam ser um aspecto com algum impacto em situações de cheia, enfim, nas zonas costeiras e estuarinas, a influência que a evolução do nível do mar (e inundações costeiras associadas incluindo as devidas a tempestades e eventos extremos) pode ter na intrusão salina dos aquíferos. Para uma adequada gestão adaptativa deste recurso, estratégia fundamental em condições de alterações climáticas, é ainda necessário, além dos aspectos citados, analisar as alterações impostas ao sistema devido a modificações na população, estilos de vida, ocupação do solo, modificações das práticas agrícolas (ex.: mudança do tipo de espécies cultivadas) muitas vezes como medida de adaptação às alterações climáticas, em suma, a avaliação das novas necessidades de

abastecimento de água para as diferentes actividades sócio-económicas e os potenciais riscos – quantidade e qualidade – relativos a este abastecimento (Figura 2).

Dentro do projecto BINGO o caso de estudo português analisa as questões dos eventos extremos (cheias e secas), a gestão de reservatórios, o abastecimento de água para as actividades agrícolas, do abastecimento urbano e energia hidroeléctrica e das águas subterrâneas (Figura 2 e Figura 3).



**Figura 3.** Área do caso de estudo português (Adaptado de BINGO Deliverable 3.1 e SNIRH)

Na componente das águas subterrâneas águas são estudados 4 aquíferos: Ota-Alenquer, Tejo-Margem Direita, Aluviões do Tejo e Tejo-Sado Margem Esquerda (Figura 3). No aquífero Ota-Alenquer a análise será simplesmente a da avaliação das alterações da recarga para as projecções climáticas dadas pelos modelos climáticos regionais melhorados durante este estudo, incluindo as projecções relativas a eventos extremos. Os aquíferos Tejo-Margem Direita, Aluviões do Tejo e Tejo-Sado Margem Esquerda, além da análise de alteração da recarga são ainda objecto de análise de evolução: (1) das piezometrias em diferentes projecções climáticas e cenários de uso do solo e captação de água, (2) da intrusão salina nas zonas estuarinas e costeiras. O objectivo primeiro é o de identificar as zonas de potencial redução ou degradação do recurso hídrico subterrâneo e que deste modo possam de alguma forma pôr em risco os futuros abastecimentos às populações e actividades económicas, com especial destaque para a agricultura. Espera-se que os resultados desta modelação permitam apoiar a análise de risco também a ser realizada no projecto BINGO e fundamentem as medidas de adaptação que se pretendem vir a elaborar.

### 3. MODELO CONCEPTUAL E MATEMÁTICO

A análise dos impactos citados sobre os 3 aquíferos Tejo-Margem Direita, Aluviões do Tejo e Tejo-Sado Margem Esquerda exige a sua modelação matemática, o que, considerando que um dos problemas a tratar é a intrusão salina, levou à escolha da ferramenta de modelação FEFLOW, desenvolvido pela DHI (<https://www.mikepoweredbydhi.com/products/feflow>).

### 3.1. Modelo Conceptual

Conceptualmente incluíram-se os 3 sistemas aquíferos acima citados como constituindo m grande aquífero regional em que estes 3 sistemas aquíferos estão hidraulicamente conectados. Consideraram-se 3 grandes unidades:

- Aluviões – correspondendo essencialmente ao aquífero Aluviões do Tejo
- Pliocénico – correspondendo às formações pliocénicas dos aquíferos Margem Esquerda e Margem Direita, constituindo uma única unidade subjacente às aluviões.
- Miocénico – correspondente às unidades miocénicas dos aquíferos Margem Esquerda e Margem Direita, constituindo uma única unidade subjacente ao Pliocénico.

Consideraram-se estas unidades como basicamente homogéneas e isotrópicas, separadas entre si por unidades argilosas de modo a criar as condições de semi-confinamento que se observam no terreno, e que todo o sistema drena para a rede hidrográfica do Tejo e, no litoral, para o oceano. Considerou-se ainda que, em condições naturais, e devido ao semi-confinamento, as unidades inferiores tendem a apresentar piezometrias mais elevadas do que as camadas sobrejacentes.

### 3.2. Modelo matemático

O modelo matemático é um modelo 3D constituído por 25 camadas (= 26 slices) e um total de 1 274 500 elementos de malha triangular, a que corresponde um total de 50 980 elementos por camada. As camadas 1 a 3 representam as aluviões, as camadas 4 a 6, o nível argiloso semi-confinante com o Pliocénico, as camadas 7 a 14 o Pliocénico, as camadas 15 a 17 o nível argiloso confinante entre o Pliocénico e o Miocénico e as camadas restantes representam as unidades miocénicas. Considerou-se fluxo em regime saturado, com a primeira camada a ser modelada como “Phreatic” e as restantes como “Dependent” dado que tanto o Pliocénico como o Miocénico têm zonas aflorantes onde o semi-confinamento naturalmente não se verifica. Para a primeira camada admitiu-se o valor de 0,2 m para a altura de água residual nas células que venham a secar.

Os rios foram definidos por condições de fronteira de potencial constante, em que  $h$  = cota do terreno, devido a dificuldades na análise e transposição para o modelo dos dados de alturas de água nos rios, esperando-se contudo que durante o desenvolvimento do modelo em regime transitório tal informação possa já ser incluída. Também como de potencial constante, com  $h = 0$  m, foram definidas as zonas costeiras de arriba por se considerar que para efeitos de exploração de águas subterrâneas a intrusão salina seria pouco relevante nessas regiões, evitando-se assim sobrecarregar o modelo.

Como zonas de condição de fronteira de fluxo constante (Figura 4) consideraram-se as fronteiras do modelo em zonas onde as mesmas litologias se estendem para o exterior das áreas definidas como sendo as dos sistemas aquíferos (como são os casos das zonas nos extremos N e NE, extremo SE (contacto com a bacia de Alvalade), assim como no contacto com a Serra da Arrábida. Quase todas estas zonas de fronteira são admitidas como áreas de descarga.

A recarga é feita entrar no modelo exclusivamente através da 1ª camada.

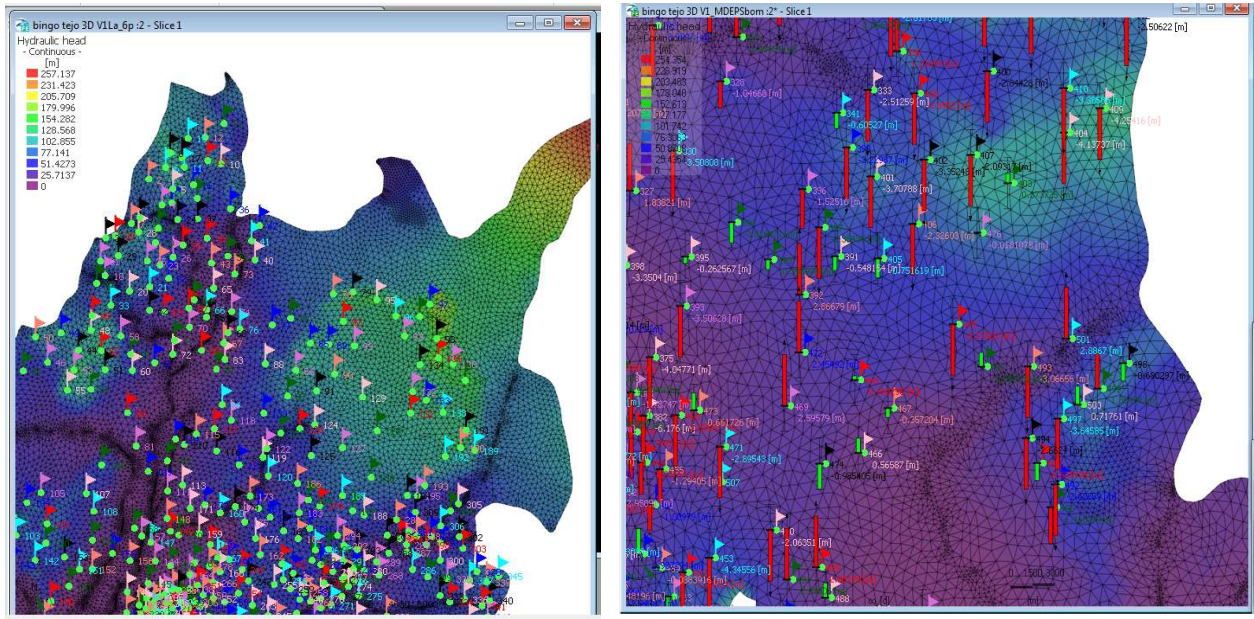




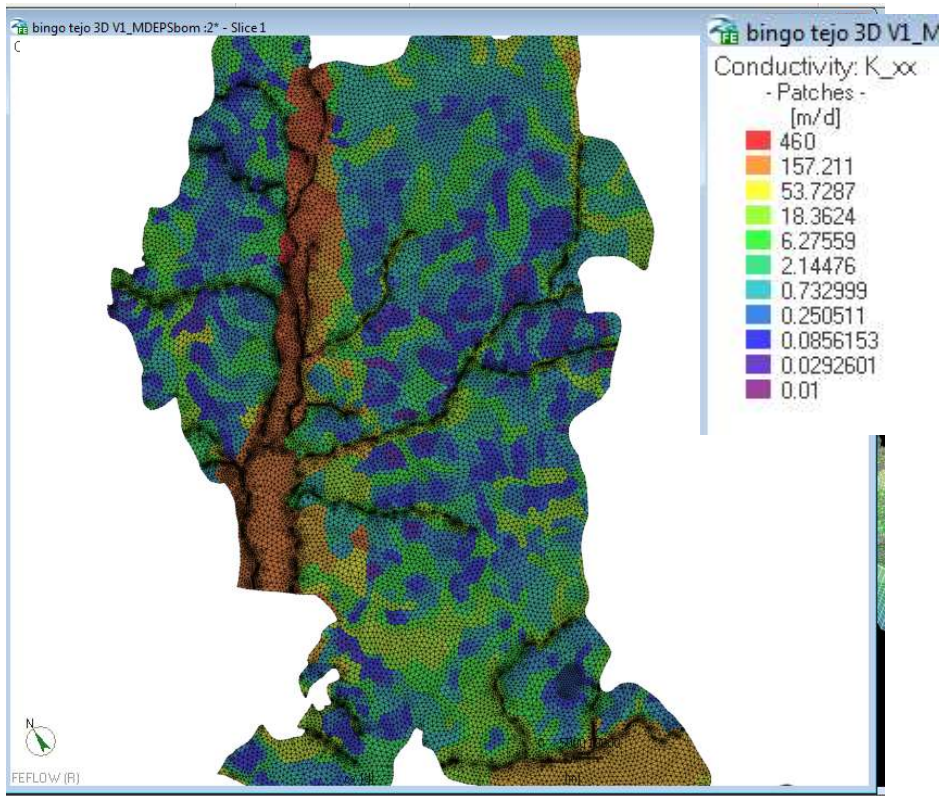
**Figura 4.** Localização das condições de fronteira de fluxo constante

### 3.3. Dados de entrada para o modelo

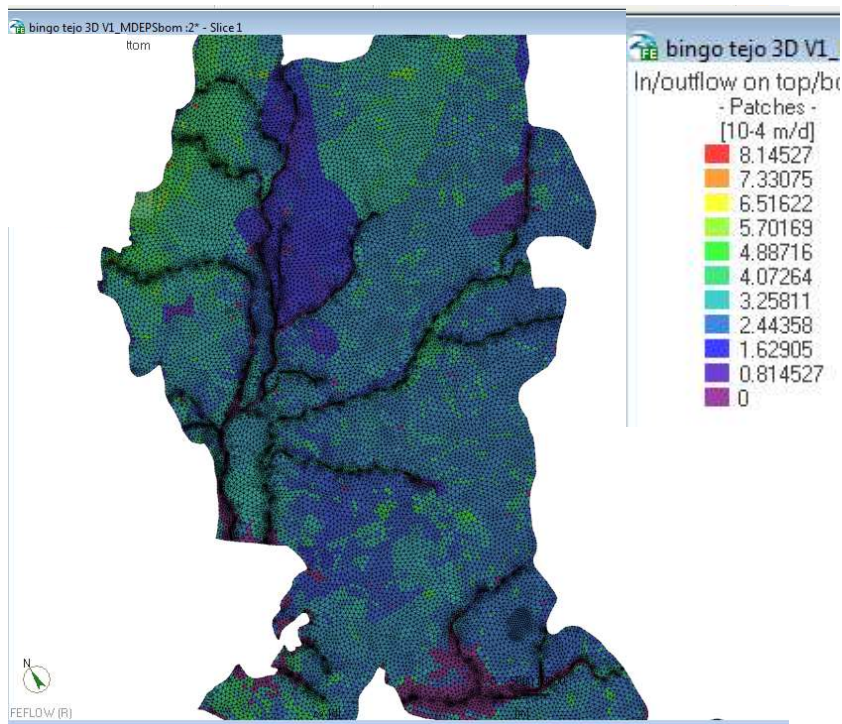
A geometria das camadas fundamenta-se na informação geológica obtida das sondagens analisadas por Simões (1998). A rede de drenagem e topografia foram obtidas através do modelo digital de terreno usado no Plano de Gestão de Bacia do Tejo de 2011 (APA, 2012), após tratamento para eliminação dos dados incongruentes. Os valores de piezometrias observadas (Figura 5) têm como fontes o referido Plano de Gestão, a base de dados de furos licenciados da CCDR-LVT e a informação obtida durante o estudo para a viabilidade do aeroporto na Ota (Lobo Ferreira et al., 2008). Os parâmetros hidráulicos foram definidos considerando os valores médios, medianos, máximos e mínimos apresentados no mesmo Plano de Bacia assim como os que se podem encontrar na literatura (Heat, 1983 em [http://www.aqtesolv.com/aquifer-tests/aquifer\\_properties.htm](http://www.aqtesolv.com/aquifer-tests/aquifer_properties.htm)), tendo sido posteriormente modificados durante a fase de calibração do modelo (Figura 6). A recarga para a calibração em condições naturais pré-alterações climáticas (Figura 7) foi adaptada dos valores determinados para o Plano de Gestão de Bacia do Tejo (APA, 2012; Lobo Ferreira et al., 2011).



**Figura 5.** Pontos de observação para calibração das piezometrias a) pontos de observação: b) erro entre valores observados e simulados



**Figura 6.** Distribuição das condutividades hidráulicas após calibração



**Figura 7.** Valores de recarga usados durante a calibração

#### **4. RESULTADOS**

Na actual fase de desenvolvimento do modelo obteve-se já a calibração para condições naturais em estado estacionário (Figura 8), reportadas ao período de 2009, que corresponde à data de início do intervalo temporal de análise do projecto BINGO. Pode assim considerar-se que os valores actuais de piezometria reflectem condições “pré- alterações climáticas” para o período de análise em consideração.

#### **5. CONCLUSÕES E FASES POSTERIORES DE DESENVOLVIMENTO**

Na fase actual de desenvolvimento do modelo, este reproduz as condições piezométricas médias do sistema aquífero para regime estacionário, à data de 2009. A fase seguinte consiste em ajustar o modelo para condições de exploração também para condições médias no período de 2009.

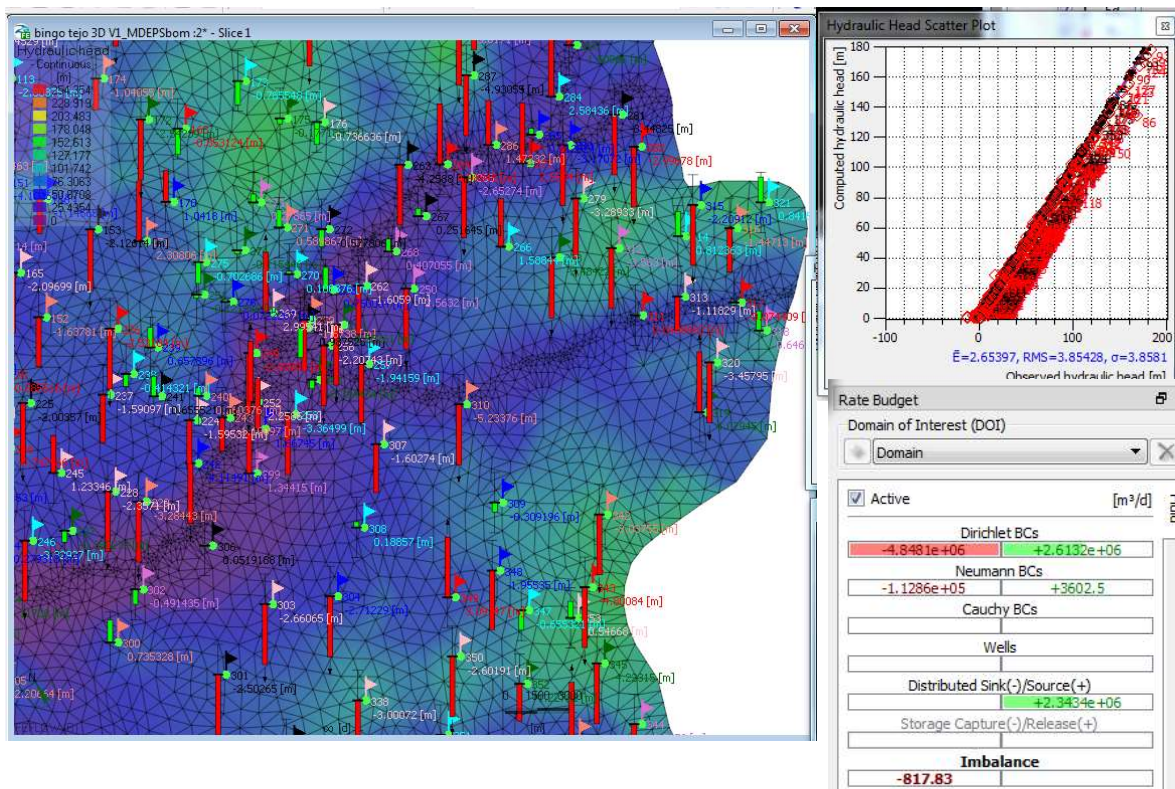
Posteriormente simular-se-á as condições de funcionamento do sistema aquífero em condições de alterações climáticas, sendo modificadas as recargas e extracções. As recargas são calculadas usando as novas condições climáticas e cenários de modificação de uso do solo, gerados pelas outras work packages do projecto BINGO. Os novos dados de exploração serão referentes aos novos cenários de necessidades hídricas (dependentes essencialmente da evolução sócio-económica) a desenvolver durante o mesmo projecto. Deste modo espera-se que o modelo possa simular a evolução dos níveis piezométricos sob as novas condições climáticas e de exploração e consequentemente identificar os impactos destas modificações, identificando as áreas onde a disponibilidade hídrica poderá encontrar-se em maior risco.



Numa terceira fase far-se-á a simulação da intrusão salina para as novas condições de evolução do nível do mar, com base nos cenários de evolução destes níveis já desenvolvidos no projecto BINGO pelo Núcleo de Estuários e Zonas Costeiras do LNEC.

Caso seja possível tratar adequadamente a informação disponível pretende-se modificar a simulação dos rios para condições de fronteira de 3º tipo, de modo ao modelo poder simular a interacção entre o sistema aquífero e a rede hidrográfica, em particular em condições de fenómenos extremos.

As questões de poluição serão simuladas se se conseguirem desenvolver cenários de evolução das cargas poluentes, o que está dependente, entre outros aspectos, dos cenários de evolução sócio-económica.



**Figura 8.** Calibração para condições naturais regime permanente, e respectivos erro de balanço e gráfico de ajustamento dos valores observados/simulados

## AGRADECIMENTOS

O Projecto BINGO Project é financiado pela União Europeia através do programa Horizon 2020.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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\\_PGRHTejo\\_Rel\\_CE\\_FD.pdf](http://sniamb.apambiente.pt/infos/geoportaldocs/Planos/PGRH5-TEJO/RelatorioTecnico_CE%5C2_PGRHTejo_Rel_CE_FD.pdf) (acedido a 27 de Junho de 2017).

BINGO Deliverable 3.1. (2016) <http://www.projectbingo.eu/content/deliverables> (acedido a 27 de Janeiro de 2017)

Glenn M. Duffield (2016). AQTESOLV – Representative Values of Hydraulic Properties [http://www.aqtesolv.com/aquifer-tests/aquifer\\_properties.htm](http://www.aqtesolv.com/aquifer-tests/aquifer_properties.htm) (acedido a 27 de Junho de 2017).

Heath, R.C. (1983). Basic ground-water hydrology, U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2220, 86p.

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.<sup>a</sup> Fase, Segunda Versão dos Conteúdos do PGRH Tejo. Versão 2. Relatório Hidroprojecto-LNEC-ICCE, PGRH Tejo, Lisboa.

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 de Janeiro de 2017)

<https://www.mikepoweredbydhi.com/products/feflow> (acedido a 27 de Junho de 2017).

<http://www.projectbingo.eu/> (acedido a 27 de Janeiro de 2017).

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