



7, 8 e 9
Março 2018
ÉVORA
Évora Hotel

GESTÃO DOS
RECURSOS HÍDRICOS:
**NOVOS
DESAFIOS**

MODELO NUMÉRICO DOS SISTEMAS AQUÍFEROS ELVAS - VILA BOIM E ELVAS - CAMPO MAIOR

Contributo para a gestão da Zona Vulnerável de Elvas

Joel, ZEFERINO¹; M. Rosário, CARVALHO²;

¹ Mestre em Engenharia Geológica, Bolseiro de Investigação, Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências, Departamento de Geologia, Edifício C6 Campo Grande, 1749-016 Lisboa, jzfeferino@fc.ul.pt

² Professora Auxiliar, Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências, Departamento de Geologia, Instituto D. Luiz, Campo Grande, 1749-016 Lisboa, mdrcarvalho@fc.ul.pt.

Resumo

A Zona Vulnerável (ZV) de Elvas (Portaria 1100/2004 de 3 setembro, Portaria n.º 164/2010, de 16 março) enquadra as massas de água desenvolvidas nos sistemas aquíferos de Elvas - Vila Boim e Elvas - Campo Maior (DGADR-APA, 2016). Para previsão do tempo necessário para que as massas de água atinjam a qualidade definida pela DQA, foi construído um modelo numérico de fluxo subterrâneo utilizando o software de modelação FEFLOW (DHI), o qual será utilizado para simular as situações de referência da piezometria nos aquíferos e servir de base à construção do modelo de transporte de massa envolvendo o ião nitrato.

O modelo foi calibrado através dos parâmetros condutividade hidráulica e recarga, com o recurso à ferramenta FEPEST (DHI). Os valores obtidos para a condutividade hidráulica oscilam entre 0,16 e 8,85 m/dia no Sistema Aquífero de Elvas - Vila Boim, e entre 0,76 e 114,4 m/dia no Sistema Aquífero de Elvas - Campo Maior. Para a recarga os valores variam entre os 192 e 29,5 mm/ano.

Os resultados obtidos comprovam que o Sistema Aquífero de Elvas - Vila Boim é um sistema bastante segmentado com nítida influência dos corpos intrusivos no funcionamento hidráulico no setor ocidental. O padrão de escoamento subterrâneo é aproximadamente radial, partindo das zonas mais elevadas centrais para as zonas fronteiriças. No setor ocidental o sistema aquífero calcário descarrega nos sedimentos que compõe o aquífero de Elvas - Campo Maior em aproximadamente 3,5 hm³/ano. Em Elvas - Campo Maior o sentido de fluxo é essencialmente para Este na direção do Rio Guadiana, que funciona como a principal zona de descarga natural de toda a massa de água subterrânea da zona vulnerável, ou perpendicular aos rios Xévoa e Caia. As saídas de fluxo para o Xévoa foram estimadas em 1,84 hm³/ano e para o Caia em 2,13 hm³/ano.

Palavras-chave: Modelação hidrogeológica, FEFLOW, FEPEST, Sistema Aquífero Elvas-Vila Boim; e Sistema Aquífero Elvas-Campo Maior

Tema: Águas subterrâneas

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

A Diretiva 91/676/CEE de 12 de dezembro de 1991, relativa à proteção das águas contra a poluição causada por nitratos de origem agrícola, foi transposta para o direito interno pelo Decreto-Lei nº 235/97 de 3 de setembro, alterado pelo Decreto-Lei nº 68/99 de 11 de março. São objetivos do diploma reduzir a poluição das águas causada ou induzida por nitratos de origem agrícola, bem como impedir a propagação desta poluição. As zonas vulneráveis, de acordo com os critérios definidos no Anexo I do referido diploma, delimitam áreas onde ocorrem águas poluídas por nitratos de origem agrícola e águas suscetíveis de o virem a ser, bem como as áreas que drenam para aquelas águas.

A Portaria n.º 164/2010, de 16 março aprova nove zonas vulneráveis (ZV) em Portugal Continental, distribuídas por 14 Massas de Água Subterrânea, as quais têm Programa de Ação para redução das concentrações de nitrato nas águas. A avaliação da efetividade da aplicação do Programa de Ação só pode ser realizada através da monitorização da qualidade da água, no entanto, não é suficiente para a previsão do tempo necessário para as massas de água das zonas vulneráveis atingirem a qualidade definida pela DQA.

A modelação numérica do fluxo subterrâneo e transporte de massa em aquíferos tem-se mostrado uma ferramenta fundamental na previsão do funcionamento hidráulico dos aquíferos e da evolução de contaminantes.

A ZV de Elvas está delimitada na região do Alto Alentejo, no distrito de Portalegre e corresponde ao alargamento da antiga ZV de Elvas - Vila Boim, englobando agora as Massa de Águas de Elvas - Vila Boim e de Elvas - Campo Maior (DGADR-APA, 2016), as quais se desenvolvem nos sistemas aquíferos com as mesmas designações (Almeida et al., 2000).

Para a previsão do tempo necessário para as massas de água integradas na ZV atingirem a qualidade definida pela DQA, foi construído um modelo numérico de fluxo subterrâneo utilizando o software de modelação FEFLOW (DHI), tendo em consideração os modelos conceptuais definidos para os sistemas aquíferos Elvas - Vila Boim e Elvas - Campo Maior. O modelo de fluxo subterrâneo será utilizado para simular as situações de referência da piezometria nos aquíferos englobados na ZV e servir de base à construção do modelo de transporte de massa envolvendo o ião nitrato.

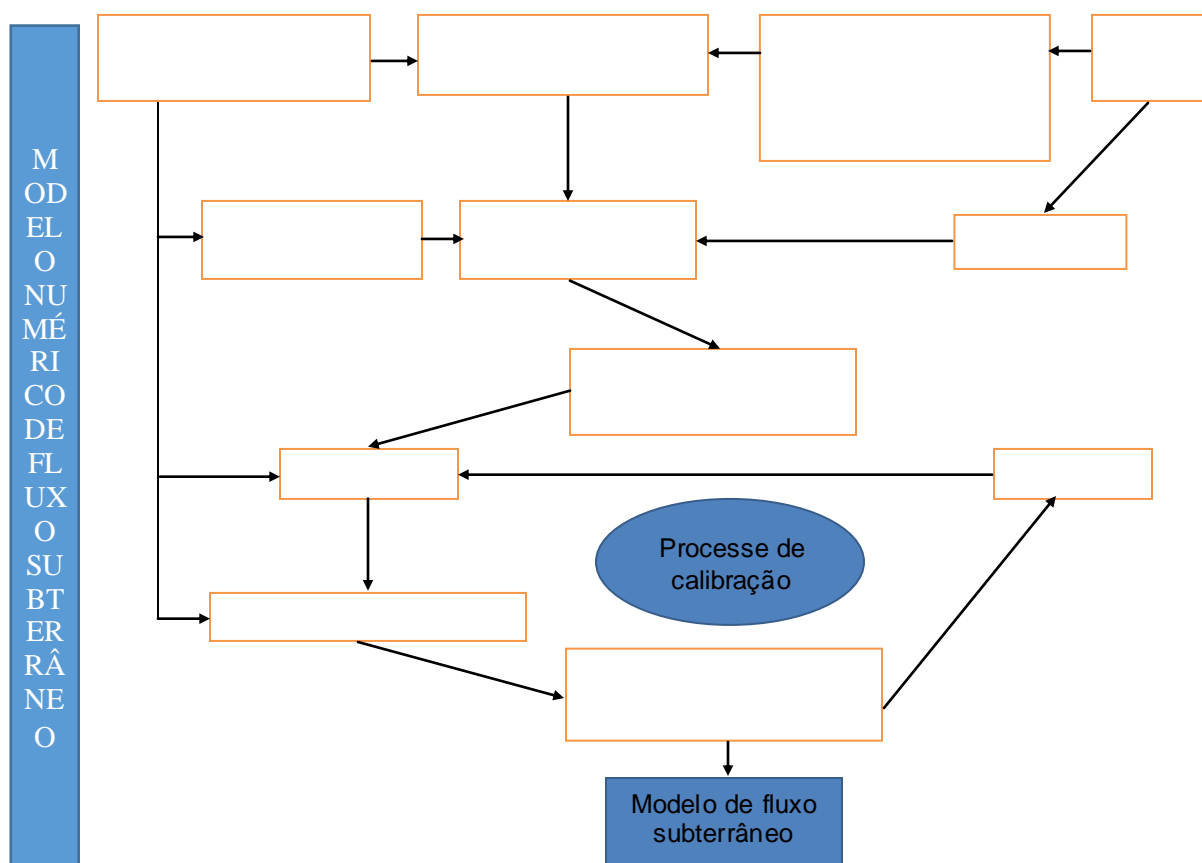
2. METODOLOGIA

Os dados geomorfológicos, geológicos e hidrogeológicos utilizados, bem como os modelos conceptuais dos sistemas aquíferos, foram recolhidos em trabalhos de investigação existentes e em bases de dados da Agência Portuguesa do Ambiente.

A modelação da superfície piezométrica e do fluxo subterrâneo foi realizada com o recurso ao *software* de modelação de aquíferos FEFLOW (DHI), desenvolvido pelo *WASY Institute for Water Resources Planning and Systems Research* (Berlim). Este *software* é uma sofisticada ferramenta de simulação tridimensional (3D) do fluxo subterrâneo e transporte de massa nas águas subterrâneas, em condições de saturação e de não-saturação. Utiliza o

A ferramenta utilizada na calibração do modelo de escoamento subterrâneo é o FEPEST (DHI), uma adaptação do software PEST, com uma interface de maior utilidade quando se processa a calibração de modelos do FEFLOW. O PEST (*Parameter ESTimation*) é um algoritmo de calibração automática, desenvolvido por John Doherty em 1994 (*Watermark Computing*, Austrália), que permite ajustar os parâmetros do modelo, de modo a que os resultados gerados se aproximem dos valores reais do sistema, permitindo assim calibrar o modelo. As diretrizes de ambos os *softwares* podem ser consultadas em www.pesthomepage.org.

A Figura 1 ilustra as principais etapas da construção do modelo numérico de escoamento subterrâneo da ZV de Elvas, considerando aspetos relacionados com a origem dos dados, geração da malha, calibração do modelo e validação do mesmo.



3

3. CARATERIZAÇÃO GEOLÓGICA E HIDROGEOLÓGICA

Os sistemas aquíferos da região integram a Bacia Hidrográfica do Guadiana, cujo principal rio ladeia a fronteira oriental da zona vulnerável, administrada pela Região Hidrográfica do Guadiana (RH7). Os sistemas aquíferos figuram nas folhas 33-C, 33-D e 37-A da Carta Geológica de Portugal, na escala 1:50000, ocupando respetivamente uma área de 113,22 km² e 176,13 km² (Figura 2).

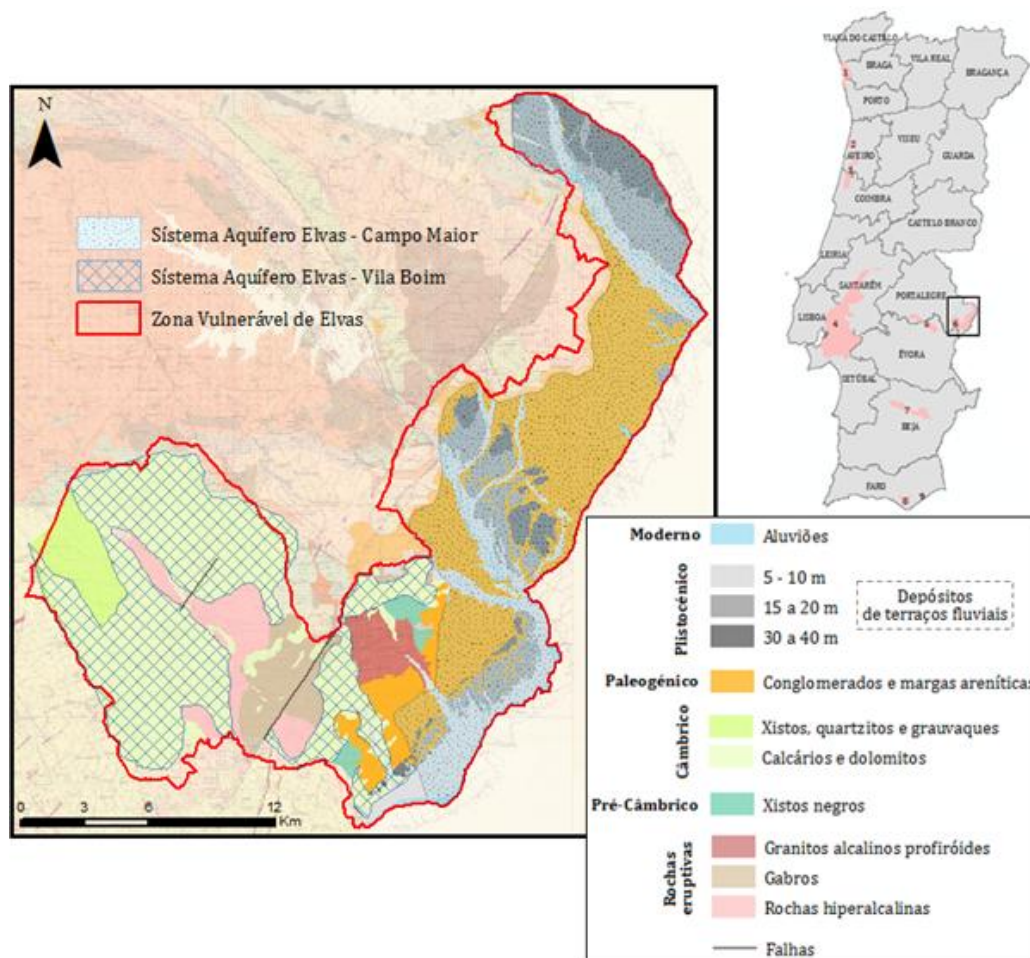


Figura 2. Representação das nove zonas vulneráveis em Portugal Continental, delimitação da zona vulnerável de Elvas e geologia dos sistemas aquíferos Elvas - Vila Boim e Elvas - Campo Maior, adaptada da Carta Geológica de Portugal à escala 1:50.000, Folhas 33-C, 33-D e 37-A.

O suporte geológico do Sistema Aquífero de Elvas - Vila Boim é a Formação Carbonatada de Elvas, constituída maioritariamente por fácies calcárias e dolomíticas. Esta formação está integrada na estrutura regional em antiforma resultante de sucessivas deformações hercínica, ocupando os relevos mais altos da região de Elvas (Vieira da Silva, 1991). A formação aquífera é parcialmente coberta no bordo leste pelas unidades paleogénicas, constituídas essencialmente por depósitos conglomeráticos, margas areníticas e arenitos, contactando ainda neste bordo com unidades quaternárias de depósitos fluviais de terraço. Segundo Gonçalves e Assunção (1970), as espessuras máximas admitidas para a formação

aquífera rondam os 250 m, com valores médios na ordem dos 200 m. Este sistema aquífero é heterogéneo, segmentado, espacialmente contínuo, mas de difícil comunicação intersectorial, resultante de barreiras hidráulicas por corpos intrusivos (rochas gabroicas e ultrabásitos). Apresenta características mistas de cársico e fissurado, com porosidade dupla, e, na sua generalidade, como aquífero livre.

A piezometria supõe comunicabilidade entre as diferentes partes do aquífero, admitindo-se subordinação do escoamento subterrâneo ao padrão de escoamento superficial (Vieira da Silva, 1991). Os gradientes hidráulicos situam-se entre os 1 e 10 %, existindo correlação com a topografia e comunicabilidade hidráulica dentro de cada setor. A maioria das nascentes situa-se no contato dos calcários com as formações envolventes, indicando que a água se infiltra no maciço carbonatado dificilmente se transfere para as formações metassedimentares e eruptivas encaixantes. As principais direções de fluxo subterrâneo neste sistema aquífero resultaram de trabalhos desenvolvidos no âmbito do projeto ERHSA (ERHSA/INAG, 2000) e estão representadas na Figura 3.

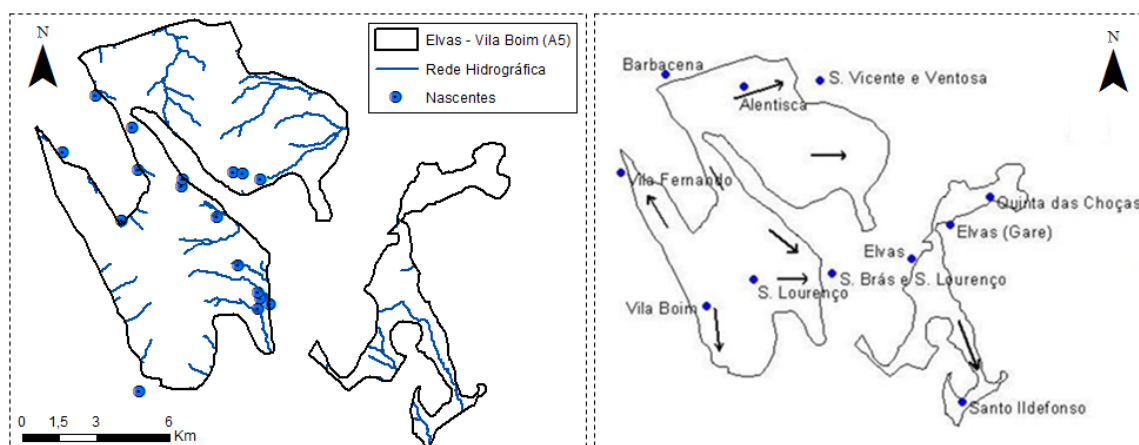


Figura 3. Rede hidrográfica, localização de nascentes e principais direções do escoamento subterrâneo no Sistema Aquífero de Elvas - Vila Boim (ERHSA/INAG, 2000).

Os depósitos terciários do bordo ocidental da bacia de Badajoz constituem o suporte geológico do Sistema Aquífero de Elvas - Campo Maior. As formações terciárias aqui presentes são predominantemente detríticas, compostas essencialmente por arenitos margosos, enquanto os depósitos quaternários são constituídos por argilas arenosas que não ultrapassam os 16 m de espessura.

A espessura média das formações aquíferas rondará os 60 na zona noroeste, 46 m na zona norte e entre os 10 e 20 m no bordo sul do aquífero (Almeida et al., 2000). O sistema aquífero é do tipo poroso, multicamada, em virtude das intercalações margosas no seio dos arenitos, o que não impede, ocasionalmente, conexão hidráulica entre camadas. A recarga dá-se diretamente onde afloram as formações aquíferas e faz-se por drenância quando estas se encontram cobertas pelos depósitos quaternários. Para este sistema aquífero não existem registos bibliográficos, nem uma rede de observações monitorizada de forma sistemática, que permitam determinar as principais características do escoamento subterrâneo. De acordo com Almeida et al. (2000) o rio Guadiana será a zona de descarga natural.

4. MODELO NUMÉRICO DE FLUXO SUBTERRÂNEO

4.1. Geração da malha e domínio do escoamento

O modelo numérico desenvolvido engloba os dois sistemas aquíferos, Elvas - Vila Boim e Elvas - Campo Maior, numa área que compreende igualmente as formações eruptivas e xistentas no setor de Elvas - Vila Boim, inseridas na zona vulnerável (Figura 4).

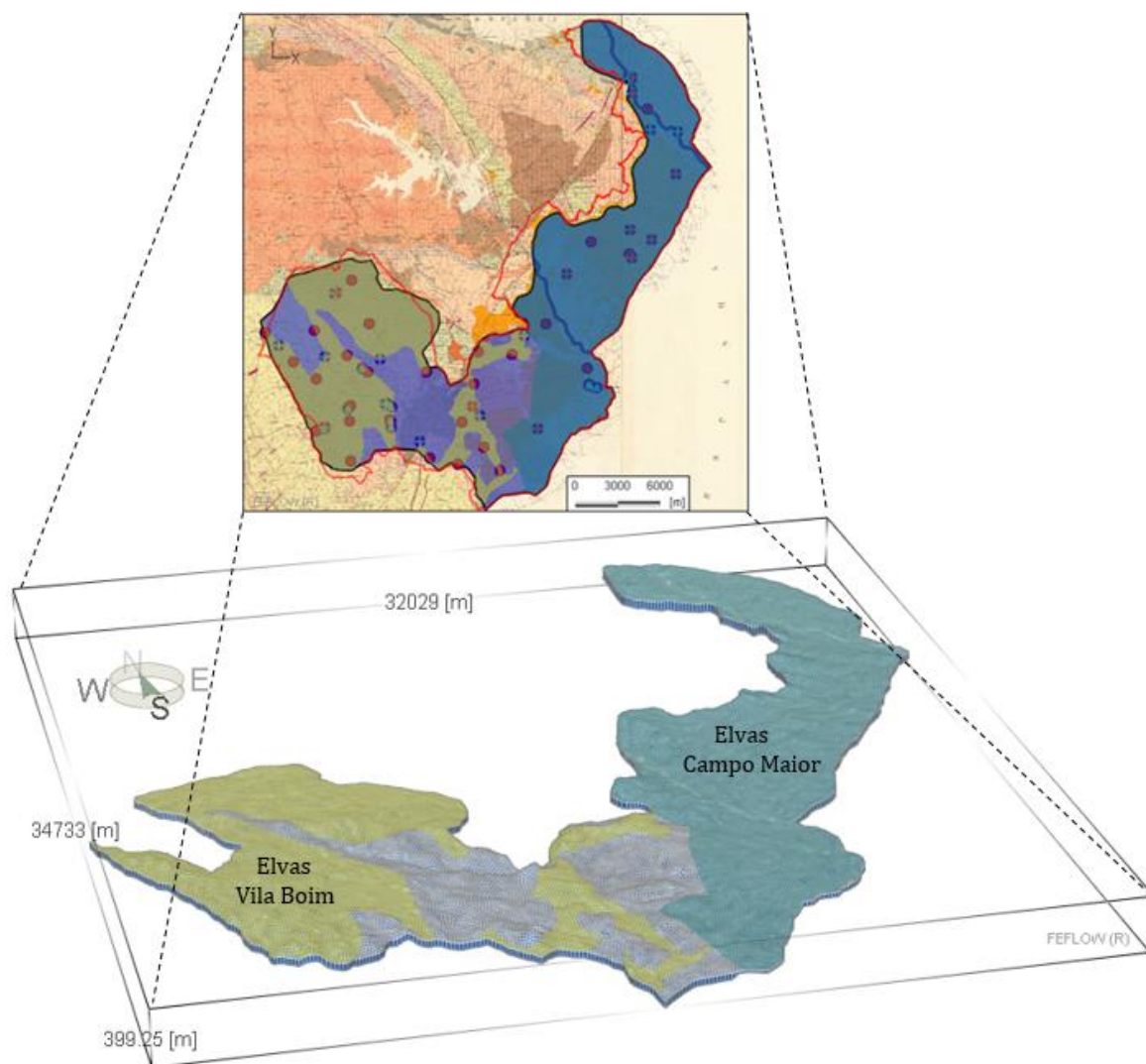


Figura 4. Elementos de entrada e malha gerada para o modelo numérico dos sistemas aquíferos, Elvas - Vila Boim e Elvas - Campo Maior.

Os corpos intrusivos foram modelados como barreiras naturais e ao escoamento subterrâneo e, como tal, procedeu-se a inativação dos elementos finitos que os caracterizam. A proximidade das duas massas de água na região sudeste pressupõe comunicabilidade hidráulica entre os dois aquíferos, existindo descarga das formações cársicas nos sedimentos quaternários. Por este motivo, simulou-se o escoamento subterrâneo das duas massas de água num só modelo. Integram o modelo numérico um total de 22 pontos de

observação, dos quais 16 pertencem à rede de quantidade do SNIRH e os restantes 6 são observações efetuadas no campo, 39 dados de qualidade e ainda 10 captações públicas. Os elementos lineares delineados para a malha do modelo representam o Rio Xévorá e o Rio Caia. A malha foi refinada precisamente nas linhas de água mencionadas e ainda nas 10 captações subterrâneas presentes. Para as formações cársicas de Elvas - Vila Boim atribui-se uma espessura uniforme de 50 m, enquanto para aquífero detrítico Elvas - Campo Maior a espessura ronda os 25 m, calculada pela média dos níveis produtivos nas captações. Finalizada a construção da malha do modelo, esta contém um total de 39857 nós e 78502 elementos finitos, composta por única camada livre de espessura variável, com a altitude a oscilar entre os 480 m e os 80 m (Figura 4).

4.2. Condições de iniciais e de fronteira

Os calcários afloram às cotas mais elevadas do modelo, sendo esta a área preferencial para infiltração direta da precipitação e recarga dos aquíferos. Neste contexto, apenas se define as áreas preferências de descarga do aquífero, ou seja, condições de fronteira que representem saídas de água do sistema. Foram assim definidas 9 zonas preferenciais de descarga subterrânea (Figura 5) através da localização de nascentes no contato com as rochas intrusivas, da rede hidrográfica, mas sobretudo pelas principais direções de escoamento subterrâneo no Sistema Aquífero de Elvas - Vila Boim.

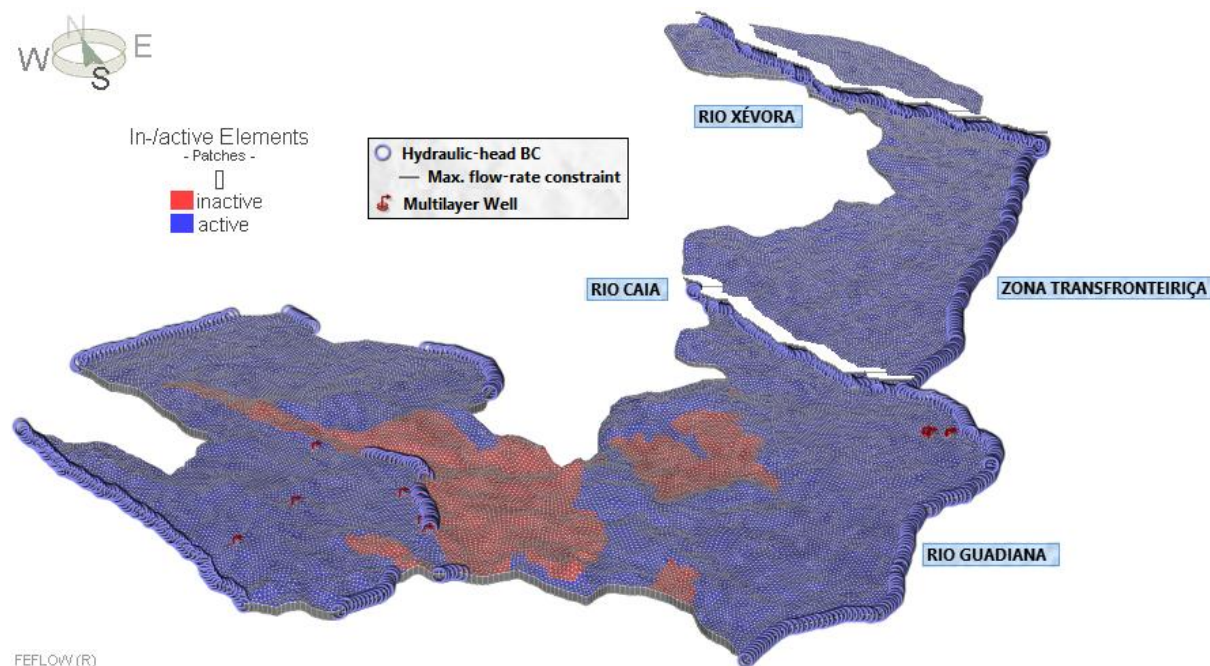


Figura 5. Condições de fronteira aplicadas no modelo numérico sistemas aquíferos, Elvas - Vila Boim e Elvas - Campo Maior

No sistema aquífero de Elvas - Campo Maior e no setor oriental de Elvas - Vila Boim, o escoamento dá-se para Este, em direção ao Guadiana ou, na zona de influencia das linhas de água permanentes, em direção ao Rio Xévorá e Caia. A estes corpos de água superficiais foram atribuídas condições de fronteira de 1ª de ordem, onde se impôs um nível piezométrico em função das cotas dos rios. O Rio Guadiana ladeia a zona vulnerável

apenas a Sudeste, no entanto, estendeu-se a fronteira para Norte, uma vez que o Guadiana corre paralelamente à fronteira, mas já em território espanhol (Figura 5).

Por último, foram adicionados ao modelo numérico 10 captações (condições de fronteira relativa a furos ou de 4ª ordem), sendo que 7 pertencem à massa de água de Elvas - Vila Boim e as restantes 3 à massa de água de Elvas - Campo Maior. Estas captações identificadas nos PGHR (APA, 2016) estão ligadas ao setor urbano e apresentam um caudal máximo de exploração de 125 m³/dia.

4.3. Parâmetros do meio poroso e calibração (FEPEST)

Os ensaios de bombeamento na região escasseiam, do modo a que os dados de condutividade hidráulica são escassos. A transmissividade dos aquíferos varia entre 7 e 171 m²/dia e entre 7,6 e 114,4 m²/dia, respetivamente, para os Sistemas Aquíferos de Elvas - Vila Boim e Elvas - Campo Maior (Almeida et al., 2000). Este parâmetro foi totalmente calibrado por calibração inversa, em função das observações piezométricas disponíveis, mas com restrições de máximos e mínimos. A recarga no Sistema Aquífero de Elvas - Vila Boim está estimada em 18,18 hm³/ano e em 9,47 hm³/ano para o Sistema Aquífero de Elvas - Campo Maior, representando aproximadamente 152 e 49 mm/ano, respetivamente (APA, 2016). Este parâmetro foi adicionado à calibração, com oscilação máxima de 40 %. A porosidade efetiva para as formações que compõem o modelo varia entre 10 % nos calcários e dolomitos de Elvas - Vila Boim e conglomerados e margas areníticas de Elvas - Campo Maior, e 25 % nas aluviões e terraços fluviais.

A calibração da condutividade hidráulica e da recarga, na camada superficial, foi efetuada através do zonamento da área com base na litologia dos aquíferos. Os calcários e dolomitos de Elvas - Vila Boim foram repartidos por 18 zonas, procurando assimilar a sectorização do aquífero e consequente funcionamento hidráulico apresentado por Vieira da Silva (1991). Os depósitos terciários foram separados em terraços fluviais e conglomerados e margas areníticas que dominam o aquífero de Elvas - Campo Maior. Os terraços fluviais foram ainda segmentados pelos 3 corpos de água superficial presentes (Xévorá, Caia e Guadiana) e seguidamente pelos níveis correspondentes (5 - 10, 15 - 20 e 30 - 40 m), obtendo-se 12 diferentes zonas. Por fim, foram atribuídas 3 zonas associadas ao conglomerados e arenitos margosos (Figura 6).

Os resultados finais da calibração são visíveis no gráfico da Figura 7 e os parâmetros derivados calculados estão representados na Figura 8. Encerrou-se o processo de calibração no momento após sucessivas iterações sem que os níveis simulados convergissem para as observações reais ou na circunstância de um ajuste de um ponto desencadear maiores resíduos nos pontos envolventes. A diferença média (resíduo) observada entre os níveis simulados e reais é de 1,64 m, considerando um universo de 18 pontos de calibração, 9 para cada sistema aquífero. O resíduo máximo cifra-se nos 6,3 m, registado no ponto de observação 413/54, numa área de empolamento do nível de água difícil de representar. O gráfico da Figura 7 demonstra a elevada correlação entre as variáveis, obtendo-se diferenças pouco significativas, tendo em conta a amplitude de valores que ronda os 300 m.

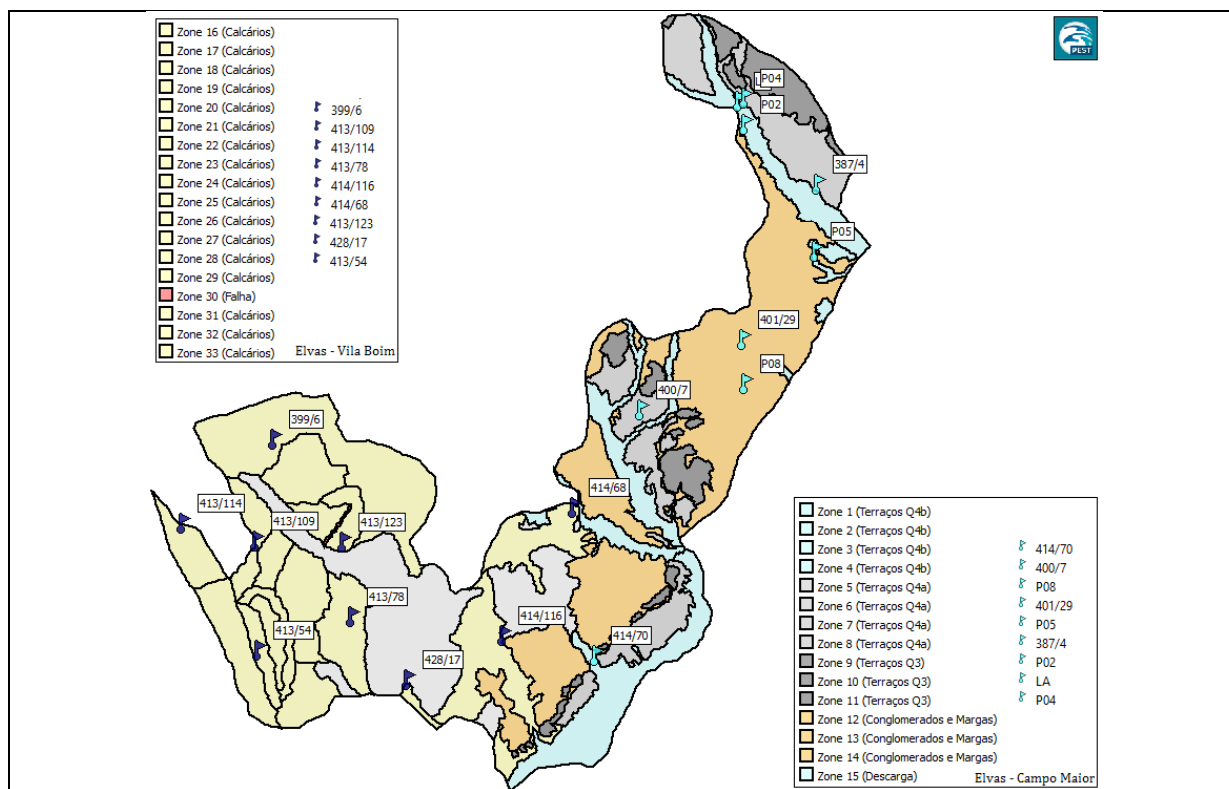


Figura 6. Zonamento e pontos de observação para a calibração da condutividade hidráulica e recarga na camada superficial do modelo numérico dos sistemas aquíferos.

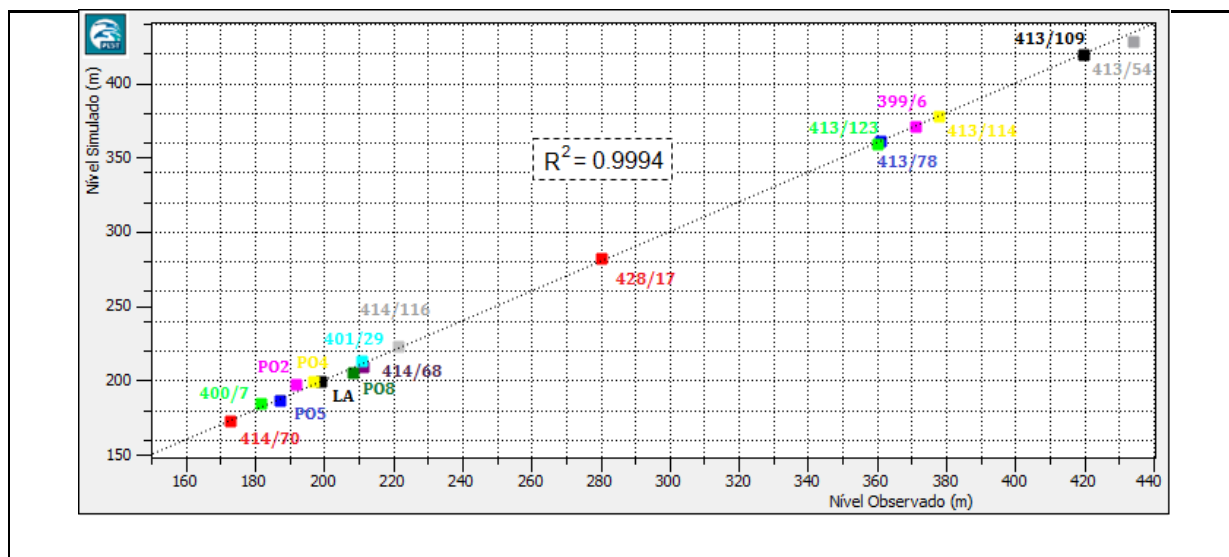


Figura 7. Resíduos obtidos por calibração inversa entre os níveis piezométricos simulados e reais nos pontos de observação e correlação entre variáveis.

Os valores obtidos para a condutividade hidráulica por calibração inversa oscilam entre os 0,16 e os 8,85 m/dia na formação calcária de Elvas - Vila Boim, e entre os 0,76 e os 114,4 m/dia nos depósitos terciários de Elvas - Campo Maior (Figura 8). Para a recarga os valores oscilam entre os 192 e os 29,5 mm/ano, isto considerando os intervalos de confiança mencionados que se situam em 40 % do valor original de recarga para cada aquífero.

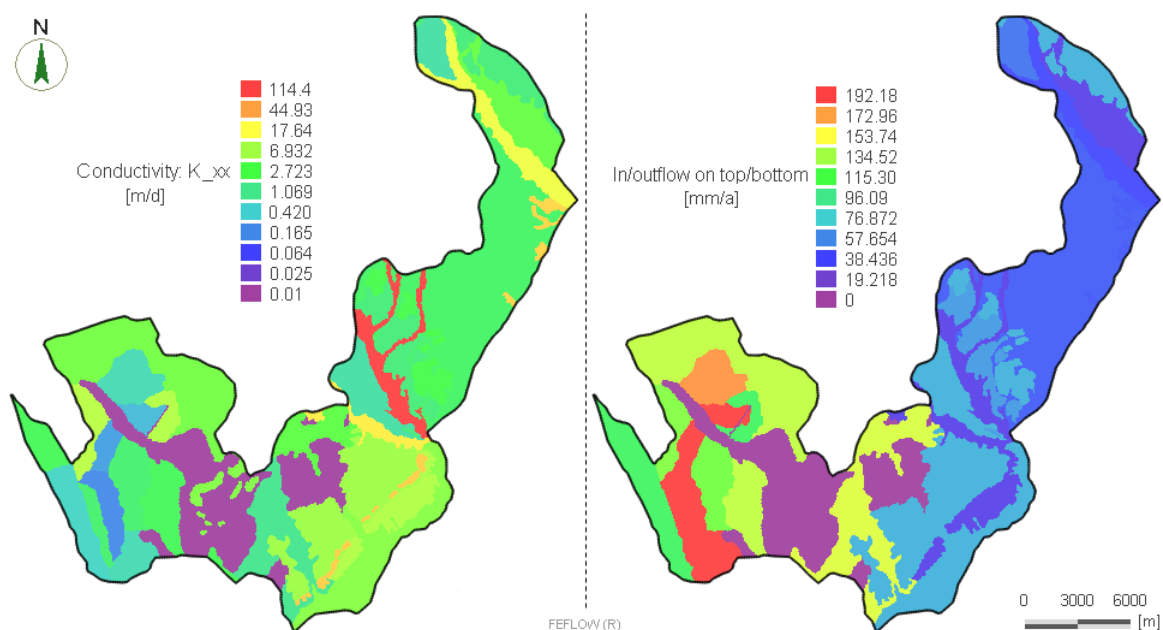


Figura 8. Condutividade hidráulica e recarga na camada superficial calculadas para o modelo numérico dos sistemas aquíferos, Elvas - Vila Boim e Elvas - Campo Maior.

4.4. Resultados obtidos e conclusões

As simulações foram efetuadas em regime estacionário para uma superfície freática ao longo de toda a massa de água. Na Figura 9 estão representados os níveis piezométricos, que oscilam entre 447 m, nos terrenos calcários mais elevados da área de estudo, e 135 m, na zona de descarga do Rio Guadiana.

Os resultados obtidos comprovam que o Sistema Aquífero de Elvas - Vila Boim é um sistema bastante segmentado com nítida influência dos corpos intrusivos no funcionamento hidráulico no setor ocidental. O padrão de escoamento subterrâneo é aproximadamente radial, partindo das zonas mais elevadas centrais, nomeadamente em S. Lourenço (Vila Boim), para as zonas fronteiriças. No setor ocidental o sistema aquífero calcário descarrega nos sedimentos que compõe o aquífero de Elvas - Campo Maior em aproximadamente 3,5 hm³/ano, valor obtido por balanço hídrico na modelação numérica.

Em Elvas - Campo Maior o sentido de fluxo é essencialmente para Este na direção do Rio Guadiana, que funciona como a principal zona de descarga natural de toda a massa de água subterrânea da zona vulnerável, ou perpendicular aos rios Xévor e Caia. As saídas de fluxo para o Xévor foram estimadas em 1,84 hm³/ano e para o Caia em 2,13 hm³/ano. De referir que estes rios só funcionam como fronteiras de descarga quando a piezometria for superior à cota do rio. A restante descarga é feita para o Guadiana ou para Espanha (mais tarde para o Guadiana), com os valores apresentados na Tabela 1. Na mesma Tabela é possível verificar que o balanço hídrico do modelo é praticamente nulo, confirmando a estabilidade do mesmo. Importa referir que para este último aquífero não estão

inventariadas as extrações que segundo os PGRH (APA, 2016) são na ordem dos 5,56 hm³/ano, mas que em Elvas - Vila Boim representam apenas 4 % do valor da recarga.

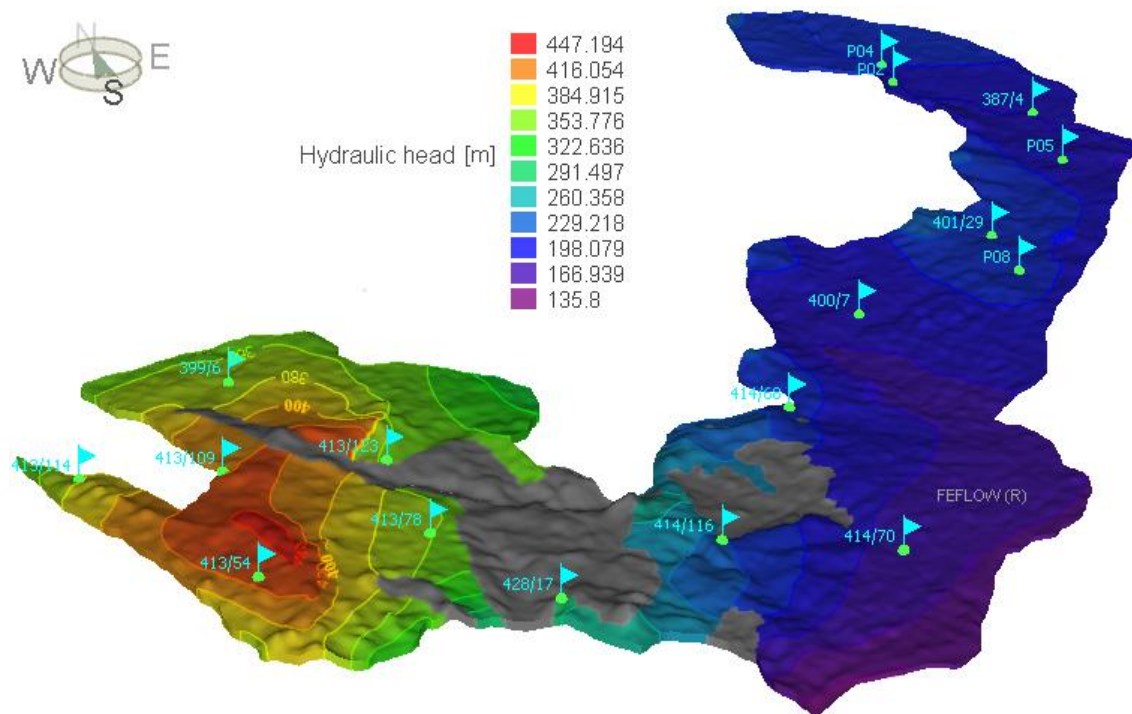


Figura 9. Modelo numérico de fluxo subterrâneo 3D dos sistemas aquíferos, Elvas - Vila Boim e Elvas - Campo Maior.

Tabela 1. Balanço hídrico obtido por modelação numérica de fluxo subterrâneo dos sistemas aquíferos, Elvas - Vila Boim e Elvas - Campo Maior.

Sistema Aquífero	Fronteiras	Entradas (hm ³ /ano)	Saídas (hm ³ /ano)	Balanço (hm ³ /ano)
Sistema Aquífero de Elvas - Vila Boim	Condição de fronteira de 1ª ordem	0,44	14,03	-13,59
	Condição de fronteira relativa a furos	0	0,28	-0,28
	Recarga na camada superficial	17,38	0	17,38
Sistema Aquífero de Elvas - Campo Maior	Condição de fronteira de 1ª ordem	0,88	14,47	-13,59
	Condição de fronteira relativa a furos	0	0,004	-0,004
	Recarga na camada superficial	10,09	0	10,09
Zona Vulnerável	Balanço hídrico final do modelo numérico	28,78	28,78	-0,3 m/dia*

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FCT o financiamento através do projeto UID/GEO/50019/2013 - Instituto Dom Luiz.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida, C., Mendonça, J.J.L., Jesus, M.R., Gomes, A.J. (2000). Sistemas Aquíferos de Portugal Continental. Sistema Aquífero: Elvas - Vila Boim (A5), Sistema Aquífero: Elvas - Campo Maior (A11). Centro de Geologia da Faculdade de Ciências de Lisboa e Instituto da Água. 80 - 91, 117 - 125 pp.

APA (2016). Plano de Gestão da Região Hidrográfica do Guadiana RH7 - 2º Ciclo. Parte 5 - Objetivos. Anexo III – Fichas de Massa de Água Subterrânea.

Carvalho, S., Midões, C., Duarte, P., Orlando, M., Simões Duarte, R., Pais Quina, A., Cupeto, C., Almeida, C., Silva, M. O. (1998). Sistemas Aquíferos de Estremoz – Cano e Elvas – Vila Boim. Estudo dos Recursos Hídricos Subterrâneos do Alentejo. 4º Congresso da Água: A Água Como Recurso Estruturante do Desenvolvimento. FIL, 23 a 27 de março de 1998, Lisboa. 16 pp.

Decreto-Lei nº 235/97 de 3 de setembro. Diário da República nº 203, I - Série-A. Ministério do Ambiente. Lisboa.

Decreto-Lei nº 68/99 de 11 de março. Diário da República nº 59, I - Série-A. Ministério do Ambiente. Lisboa.

DGADR-APA (2016). Poluição Provocada por Nitratos de Origem Agrícola - Diretiva 91/676/CEE, de 12 de dezembro - Relatório 2012-2015. Agência Portuguesa do Ambiente e Direção Geral de Agricultura e Desenvolvimento Rural. 249 pp.

Diersch, H.J. (2013). FEFLOW: Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media. Springer Science & Business Media, Berlin.

Directiva do Conselho (91/676/CEE) de 12 de dezembro de 1991 relativa à proteção das águas contra a poluição causada por nitratos de origem agrícola (91/676/CEE). Jornal Oficial das Comunidades Europeias.

ERHSA/INAG (2000). Estudo dos Recursos Hídricos Subterrâneos do Alentejo. Sistema Aquífero A5 - Elvas - Vila Boim.

Gonçalves, F. e Assunção, C. T. (1970). Carta Geológica de Portugal na Escala 1:50000. Notícia Explicativa da Folha 37-A Elvas. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa 50 pp.

Portaria nº 164/2010, de 16 março. Diário da República nº 52, I - Série. Ministério da Agricultura, do Desenvolvimento Rural e das Pescas, Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território. Lisboa.

Vieira da Silva, A. M. (1991). Hidrogeologia de uma Área do Sistema Aquífero de Elvas - Vila Boim. Dissertação de Mestrado em Geologia. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. Departamento de Geologia. Lisboa. 224 pp.