

Modelo numérico de fluxo em regime transitório: o caso do aquífero Moura-Ficalho

Augusto T. MARQUES da COSTA

Geólogo Assessor Principal, Dpt de Hidrogeologia, INETI, Apartado 7586, 2720- 866 Alfragide, +351.21.4705542, augusto.costa@ineti.pt

Alain FRANCÉS

Geólogo, Dpt de Hidrogeologia do INETI, Apartado 7586, 2720- 866 Alfragide, +351.21.4705539, frances.alain@ineti.pt

Maciek LUBCZYNSKI

Professor Associado, Water Resources Department, ITC, Hengelosestraat 99, P.O.Box 6; 7500 AA Enschede, The Netherlands, +31.53.4874277, lubczynski@itc.nl

Luis F. T. RIBEIRO

Professor Associado, CVRM-Centro de Geossistemas, IST, Av.Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, +351.21.8417247, nlrib@alfa.ist.utl.pt

Em Portugal têm sido utilizados, com alguma frequência, modelos de escoamento hídrico subterrâneo em regime permanente, para descrever quantitativamente modelos conceptuais de funcionamento de formações aquíferas. Também em relação ao Aquífero Moura-Ficalho foi anteriormente apresentado um modelo deste tipo (ERHSA e outras referências de artigos).

O conjunto de dados, especialmente os que resultam da rede monitorização piezométrica deste aquífero (Costa *et al.*, 1998), associado a várias outras investigações entretanto iniciadas, nomeadamente sobre a variação espaço-temporal da recarga (Chomba, 2004), foram utilizados no desenvolvimento de um modelo numérico de escoamento em regime transitório, para o período entre Outubro de 2000 e Maio de 2005, com projecções até Dezembro de 2005.

Foi reformulado o modelo permanente e, na fase de calibração, quer deste quer do transitório, foram utilizadas técnicas de modelação inversa na minimização de erros associados a vários parâmetros. Em particular no que respeita à permeabilidade horizontal, obteve-se um mapa de permeabilidades com o qual foi possível obter erros menores do que com outro modelo, mais complexo, em que não se utilizou a modelação inversa. Este mapa de permeabilidades obteve-se com o algoritmo PEST, utilizando os chamados "pilot points".

São confrontados os resultados obtidos com os dois modelos concluindo-se que o mais simples poderá dar respostas mais fiáveis na previsão de cenários para apoio à gestão do aquífero.

A situação real que se apresenta espera-se que constitua um contributo para a generalização da utilização da modelação numérica e, em particular da modelação inversa, no domínio da Hidrogeologia no nosso País.

Palavras chaves: modelo, transitório, modelação inversa, aquífero, calibração.

1. INTRODUÇÃO

Neste artigo é apresentada a modelação numérica do escoamento subterrâneo na zona saturada em regime transitório do aquífero de Moura-Ficalho, usando o código MODFLOW-2000 (Harbaugh *et al.*, 2000).

A modelação do escoamento subterrâneo é frequentemente utilizada em diferentes tipos de estudos hidrogeológicos, permitindo acompanhar a resposta do sistema a diversas solicitações. Enquanto os modelos em regime permanente focam sobre os comportamentos a longo prazo, a modelação em regime transitório é necessária para o estudo do comportamento dinâmico do sistema, particularmente quando está confrontado com fortes pressões antrópicas ou condições naturais extremas.

Em regime transitório, enquanto os parâmetros físicos do aquífero (condutividade hidráulica, coeficiente de armazenamento) são considerados estáticos, as condições de fronteiras, que definem as entradas e saídas do sistema (extrações e recarga) conhecem grandes variações ao longo do tempo. O parâmetro recarga é sempre delicado de avaliar, sendo dependente de numerosos parâmetros climáticos, pedológicos e geológicos entre outros. Por isso, é geralmente considerado como variável a ajustar nos processos de calibração. Apesar desta técnica ser válida em clima temperado, onde as taxas de recarga são bastante elevadas, e para a modelação em regime permanente, observou-se que, em condições extremas e/ou em meios áridos ou semi-áridos onde existem uma grande variabilidade espaciotemporal dos fluxos hidrogeológicos (precipitação, evapotranspiração, recarga) e várias ordens de grandeza de diferença entre eles, esta aproximação resulta em balanços hidrogeológicos e cenários de previsão incorrectos (Lubczynski, 2000; Hendrickx *et al.*, 2003; Lubczynski *et al.*, 2005).

Neste caso de estudo, a recarga foi avaliada a partir de dados meteorológicos e piezométricos diários, usando o modelo unidimensional EARTH (Van der Lee *et al.*, 1990). Este é baseado em métodos determinísticos de cálculo do balanço hídrico no solo e métodos indirectos para a calibração a partir das flutuações do nível piezométrico. As primeiras estimativas apontam para valores de recarga entre 37,8 e 42,4% da precipitação (Chomba, 2004).

Na calibração, foi utilizado a modelação inversa com o algoritmo PEST para optimização da permeabilidade horizontal e do coeficiente de armazenamento específico. Usando "pilot points", obteve-se um mapa de permeabilidades com valores muito variáveis, sendo menores na principal zona de recarga e aumentando para as zonas de descarga do aquífero, o que se afigura como realista. Esta ferramenta revelou constituir uma técnica eficaz na minimização de erros.

2. ÁREA DE ESTUDO

A presente área de estudo estende-se entre os paralelos 38°12'N e 37°56'N, isto é, desde cerca de quatro quilómetros a norte de Moura até cerca de um quilómetro a sul de Vila Verde de Ficalho. Os meridianos que delimitam esta área são os 7°31'W e 7°13'W, que passam a cerca de 4 quilómetros a oeste de Pias e na povoação de Safara, respectivamente.

3. GEOLOGIA

A região é dominada pela existência de três alinhamentos de relevo principais, que se desenvolvem em direcções próximas de SE-NW, entre Sobral da Adiça e Moura, V.V. de Ficalho e Moura e entre Vale de Vargo e Moura. Trata-se, por isso, de um conjunto de relevos alongados e ligeiramente convergentes em direcção à zona entre Moura e Pisões (Figura 1).

Os relevos alinhados correspondem a dobras anticlinoriais de rochas carbonatadas, essencialmente constituídos por dolomitos cinzentos, com algumas intercalações de metavulcanitos na base, e um nível descontínuo de rochas siliciosas no topo. Esta sequência litológica corresponde à "Formação Dolomítica", atribuída ao Câmbrio.

Algumas destas dobras chegam a apresentar afloramentos da zona nuclear, constituídos por xistos negros, com intercalações mais os menos siliciosas, embora de reduzidas dimensões, que correspondem à chamada "Série Negra", de idade pré-câmbrica.

As zonas mais deprimidas correspondem a estruturas sinclínicas, de rochas menos resistentes à erosão, que fazem parte do "Complexo Vulcano Sedimentar de Ficalho-Moura", de idade ordovícica, constituído por níveis descontínuos de mármore calcítico e calcários dolomíticos (equivalente ao "Olho de Mocho"), com passagens laterais e para o topo, a metavulcanitos.

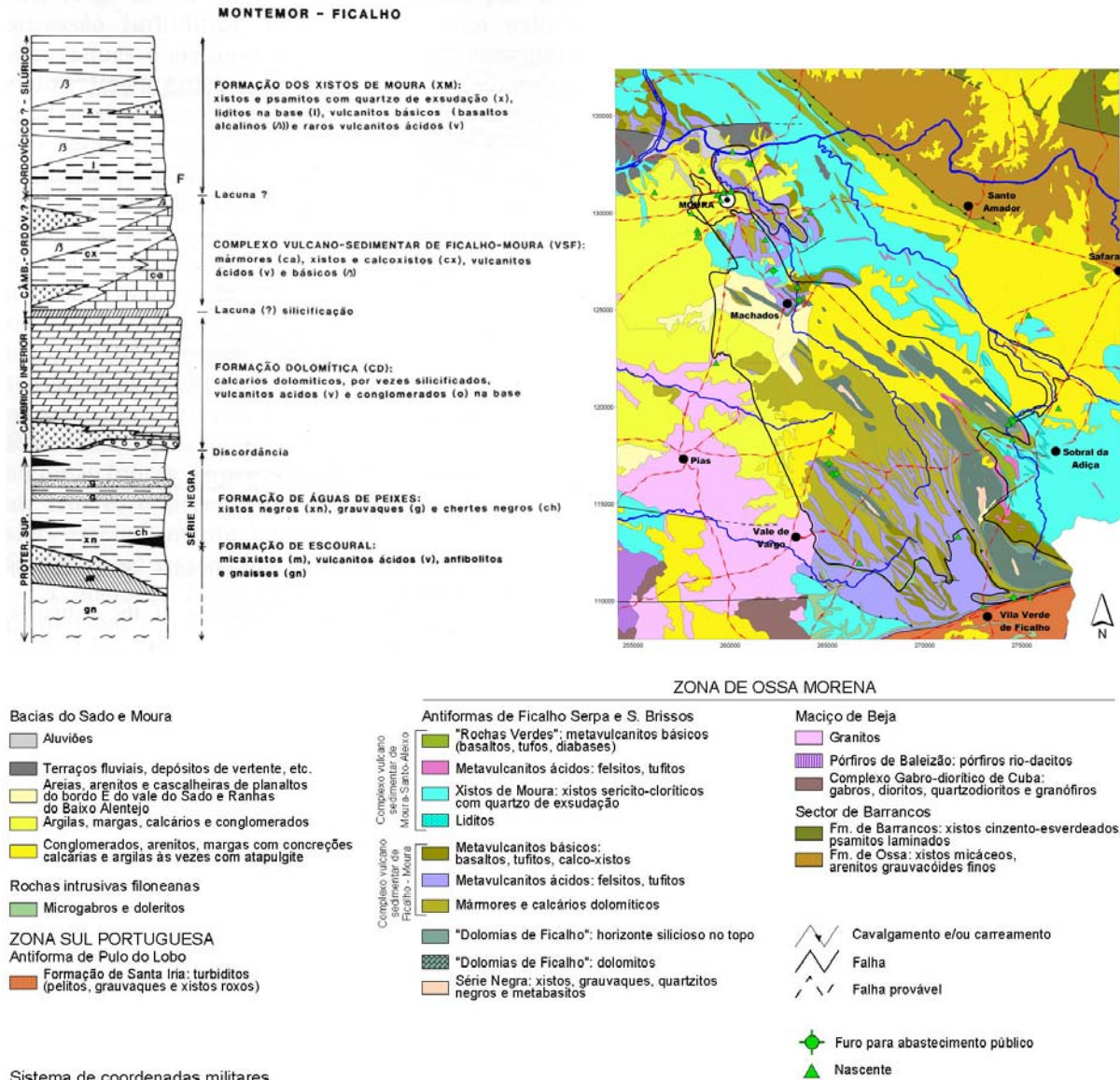


Figura 1 - Sequência estratigráfica simplificada (In Oliveira *et al.*, 1991) e carta geológica

As dobras de orientação hercínica (NW-SE), são cortadas por diversos acidentes tectónicos transversais, dois dos quais delimitam a norte e a sul o sistema aquífero, nomeadamente:

- A norte, o sistema de falhas ligado à falha da Vidigueira;
- A sul, a falha de Ferreira-Ficalho, que separa a Zona de Ossa-Morena da Zona Sul Portuguesa.

Além das falhas com direcções próximas de E-W, existem ainda falhas NE-SW e outras coincidentes com a direcção dos eixos das dobras, que originam cavalgamentos de NE para SW. As

próprias dobras principais são sub-verticais, por vezes com vergência para SW, embora com planos axiais muito inclinados.

Com excepção da estrutura da Preguiça, cujo eixo de dobra mergulha para SE, as restantes estruturas, à medida que caminhamos de Sobral da Adiça para Moura, apresentam mergulhos neste sentido (para NW).

No extremo SE da área de estudo, a estrutura da serra de Ficalho, chega a apresentar uma orientação E-W, mergulhando esta dobra para E, em direcção ao Rosal de la Frontera (Espanha), devido à actividade do cavalgamento de Ferreira-Ficalho, que aqui apresenta uma forte componente de desligamento esquerdo, com rejeito de vários quilómetros (Victor de Oliveira, informação oral).

Na zona oriental desta área, desenvolve-se para NE uma vasta zona aplanada, que se prolonga a norte da "falha da Vidigueira", sendo dominada pela existência de xistos, liditos e metavulcanitos do "Complexo vulcano-sedimentar de Moura-Santo Aleixo", com idades distribuídas entre o Ordovícico e o Silúrico, confirmada pela descoberta de graptólitos silúricos em liditos que constituem níveis intercalares nos chamados "Xistos de Moura" (Piçarra, J.M, 1991).

A zona ocidental é dominada pela existência de maciços intrusivos, pertencentes ao "Maciço de Beja", de natureza litológica diversa. São dominantes, nesta zona, os granitos, que constituem um maciço habitualmente identificado na bibliografia como "Granito de Pias".

A sul da falha de Ferreira-Ficalho, já na Zona Sul Portuguesa, encontram-se os xistos da "Formação de St^a Iria" que, embora apresentem localmente silicificações relacionadas com a actividade tectónica, apresentam normalmente uma fácies bastante argilosa. A esta unidade é atribuída idade devónica.

O substrato hercínico desta região encontra-se parcialmente coberto por formações cenozoicas. Particularmente importantes, pelo papel hidrogeológico que desempenham, são as coberturas terciárias de Moura e de Safara, especialmente junto à ribeira da Toutalga, e de Belmeque. Também as formações aluvionares da ribeira da Toutalga e do rio Ardila assumem, por vezes, importante papel hidrogeológico.

As acções tectónicas que devem ter soerguido toda esta região, sobre a qual passaram a actuar os mecanismos de erosão normal conduzindo ao modelado actual do relevo, originaram também a acumulação das cascalheiras plio-quadernárias assinaladas na Figura 1.

No que respeita à geomorfologia, são evidentes os indícios de acções cársicas, que devem corresponder a diversos ciclos de carsificação, por vezes condicionados tectonicamente. Assim, na extremidade SE da serra da Preguiça encontra-se um paleocarso, fossilizado pela acumulação de óxidos e hidróxidos de ferro, chumbo e zinco. As grandes dimensões das aberturas cársicas (evidenciadas pela remoção, por exploração mineira a céu aberto, do respectivo preenchimento), devem resultar de um ciclo cársico, provavelmente miocénico, relacionado com a formação, em ambiente sedimentar fechado, dos sedimentos carbonatados desta idade.

Encontram-se ainda outros indícios de fossilização de aberturas cársicas, por depósitos conglomeráticos, de natureza essencialmente carbonatada, provavelmente já no período Quaternário, como sucede próximo do Outeiro de Santo António (junto à sondagem SHSantoAntónio1) e no Monte dos Machados.

4. Climatologia

No Quadro I são apresentados os resultados do balanço de água no solo em várias estações dos arredores da área de estudo para séries plurianuais (Costa, 2001).

Da análise deste quadro destaca-se:

- A temperatura média anual varia entre 15.2 e 17.5°C;
- A precipitação total anual varia entre 437 e 730 mm, sendo a mediana de 526;
- A evapotranspiração potencial anual varia entre 798 e 860 mm;
- A evapotranspiração real anual varia entre 374 e 462 mm;

- O deficit hídrico anual varia entre 339 e 462 mm;
- O superavite hídrico anual varia entre 40 e 267 mm;
- O clima da região é sub-húmido seco, 2º mesotérmico e com superavit de água moderado no inverno, tendo por extremos opostos a estação da Contenda (clima sub-húmido húmido, com deficit de água grande no verão) e de Moura (clima semi-árido, com excedentes de balanço praticamente nulos).

Quadro 1 – Valores médios anuais do balanço de água no solo

Posto udométrico	Temperatura média anual (°C)	Precipitação anual (mm)	ETP (mm)	ETR (mm)	Deficit hídrico (mm)	Superavite hídrico (mm)	Expressão do clima	Período
Moura	17.5	437.4	816.6	374.0	462.1	39.9	D B`3 d b`4	1941 - 63
Monte da Torre	15.2	517.4	797.5	458.2	339.3	91.7	C1 B'2s a'	1981 - 96.
Amieira	16.1	541.0	859.6	422.8	436.8	118.2	C1 B'3 s b'4	1981 - 96
Contenda	15.9	729.5	829.1	462.3	366.8	267.2	C2 B'2 s2 a'	1961 - 80
Amareleja	15.8	525.6	833.5	450.4	414.5	106.6	C1 B'2 s b'4	1963 - 80

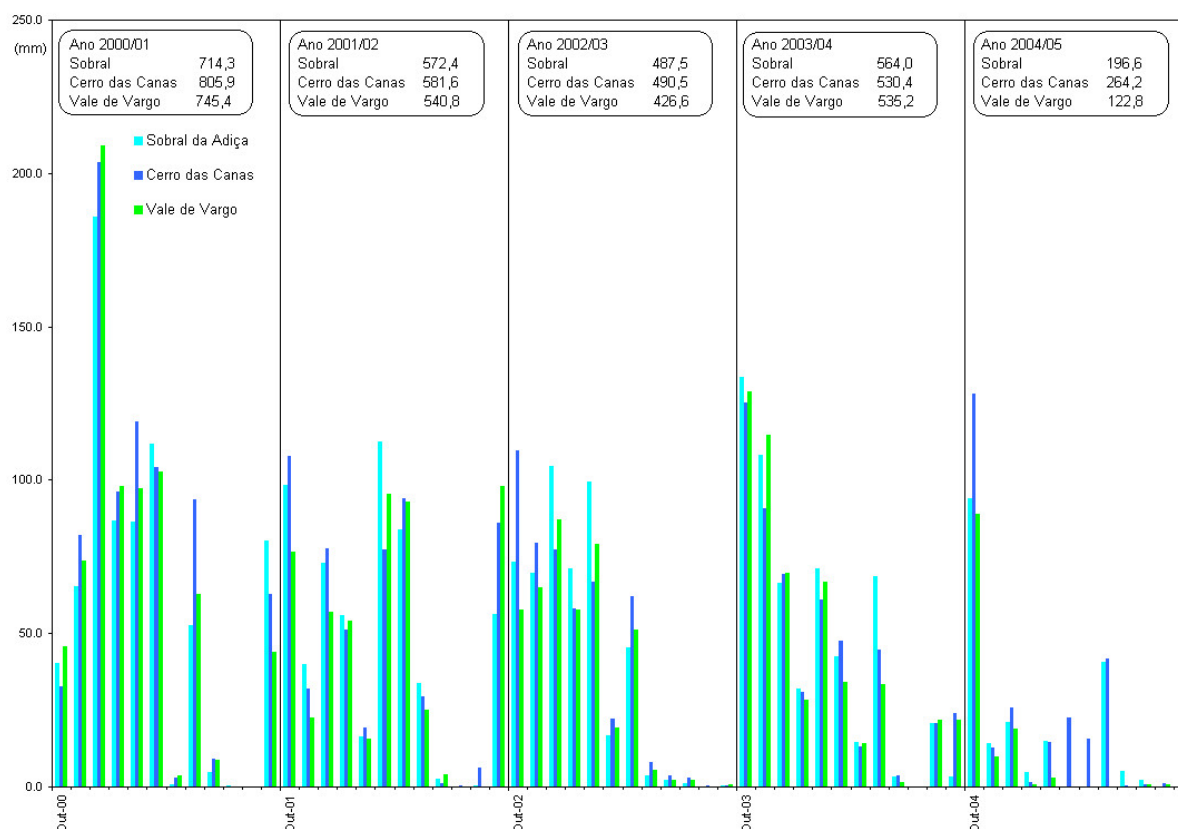


Figura 2– Valores de precipitação mensais e anuais para 3 postos udométricos

Para o presente estudo foram considerados os postos udométricos de Sobral de Adiça (INAG), de Cerro das Canas (INETI) e de Vale de Vargo (INETI), entre Outubro de 2000 e Setembro de 2005 inclusive. Os valores mensais e anuais são apresentados na Figura 2.

5. SISTEMA AQUÍFERO MOURA-FICALHO

Nas condições climáticas sumariamente descritas, só uma conjugação de factores geológicos, estruturais e geomorfológicos, permite a constituição de aquíferos, cuja importância para o abastecimento público e particular, dos concelhos de Moura e Serpa, é inegável.

O escoamento hídrico subterrâneo desta região é dominado pela existência de um aquífero de tipo cársico-fissurado que se desenvolve entre Vila Verde de Ficalho e Moura (Aquífero Moura-Ficalho). Foram identificados outros aquíferos, de menores dimensões, em parte recarregados por este (Figura 3):

- Aquífero Moura-Brenhas;
- Aquífero dos Calcários de Moura;
- Aquífero da Ribeira de Toutalga.

O conjunto dos aquíferos referidos constituiu o Sistema Aquífero Moura-Ficalho.

O Aquífero Moura-Brenhas tem uma constituição litológica muito semelhante ao principal, predominando os calcários dolomíticos, e constituiu uma dobra anticlinal a oeste de Moura. É recarregado por infiltração de água da Ribeira de Brenhas, depois de esta ser alimentada pela nascente das Enfermarias, que é uma das descargas naturais do aquífero principal.

O Aquífero dos Calcários de Moura é constituído pela cobertura cenozóica da zona de Moura e é recarregado subterraneamente pelo Aquífero Moura-Ficalho. Trata-se essencialmente de calcários e calcarenitos, mais ou menos argilosos.

O Aquífero da Ribeira da Toutalga é um aquífero confinado, situado provavelmente na base da cobertura cenozóica da zona de confluência das Ribeiras da Toutalga e de S. Pedro, e é recarregado por infiltração de águas destas duas ribeiras. O segundo destes cursos de água é alimentado durante a estiagem exclusivamente a partir da nascente do Gargalão, outra das principais descargas naturais do Aquífero Moura-Ficalho.

Saliente-se ainda a existência de ocorrências hidrominerais na zona, nomeadamente a concessão Pisões-Moura e a concessão Santa Comba e Três Bicas, além de uma possibilidade de revelação futura de uma nova concessão hidromineral com tradição popular conhecida por Banhos da Ferradura (Costa *et al.*, 2005).

O Aquífero Moura-Ficalho é, como se pode constatar no mapa do Sistema Aquífero da Figura 3, o mais extenso da região, com uma área total da ordem de 177 Km², da qual apenas 77 Km² correspondem a rochas carbonatadas. O suporte físico do aquífero é constituído por rochas carbonatadas do soco hercínico:

Dolomitos do Câmbrio inferior ("Dolomias de Ficalho");

Mármore calcítico e calcários dolomíticos, por vezes com intercalações de metavulcanitos, do Ordovícico médio ("Complexo vulcano-sedimentar Ficalho-Moura").

Os contornos representados na Figura 3 correspondem a contrastes litológicos, entre as formações essencialmente carbonatadas do aquífero e as formações, impermeáveis ou menos permeáveis, que as envolvem. Estes contrastes correspondem a diferentes tipos de contactos geológicos, que vão desde contactos geológicos normais (por subida ou descida na sequência litoestratigráfica), a que poderemos chamar "contactos litoestratigráficos", até aos contactos com rochas intrusivas, passando ainda por contactos tectónicos.

A espessura do aquífero principal é grande, sabendo-se agora que chega a atingir os 690 metros de profundidade, em Moura, e 400 metros de profundidade, a cerca de 1.5 Km a SE desta cidade, junto ao Casal de Santo André (ver perfil hidrogeológico da Figura 4).

Este aquífero tem um comportamento cársico-fissurado, que embora se apresente livre em várias zonas, é na maior parte da sua extensão, um aquífero confinado. A permeabilidade reduz-se em profundidade, passando dos valores elevados característicos de um meio cársico a valores pequenos, característicos de um meio fissurado. Os valores de transmissividade calculados em vários ensaios de bombagem e recuperação indicam valores de transmissividade entre 10 e 3500 m²/dia e valores de

coeficiente de armazenamento da ordem de 0.2. Em níveis profundos os valores estimados através de ensaios com packers em sondagens, fornecem valores de permeabilidade muito inferiores, especialmente nos níveis mais profundos.

O fluxo subterrâneo tem, na globalidade, a orientação dos eixos da dobras, no sentido SE-NW, embora localmente se verifiquem situações diferentes. Alguns dos sentidos de fluxo foram re-interpretados na sequência dos mapas piezométricos resultantes dos modelos numérico de escoamento agora desenvolvidos (Figura 5). De facto houve necessidade de reformular algumas ideias pré-concebidas sobre este assunto. A título de exemplo, pode concluir-se que na serra da Preguiça, onde se supunha que o fluxo subterrâneo seguisse a orientação do eixo da dobra, concluiu-se agora que o fluxo se faz, em geral, de E para W e não essencialmente de NW para SE, como anteriormente se supunha. De facto, além da nascente do Gargalão, na parte terminal da estrutura da Preguiça, existem descargas mais ou menos ocultas ao longo do flanco NE deste anticlinal, que apenas no modelo numérico agora proposto foram consideradas.

A característica geológica mais importante para a formação e funcionamento deste aquífero, com as particularidades que apresenta e as relações com os restantes sub-sistemas parcialmente dependentes do principal, é a falha do Castelo. Esta, que embora não tenha sido cartografada se representa na parte terminal do perfil (Figura 4), deve constituir o bordo sul do graben, com orientação E-W (zona deprimida a norte de Moura aproveitada pelo troço terminal do Rio Ardila), cujo bordo norte corresponde à falha da Vidigueira, assinalada no mapa geológico (Figura 3).

A falha do castelo comporta-se como barreira impermeável, ou muito menos permeável, evitando o que seria a tendência natural deste aquífero, isto é, a água continuar o seu trajecto subterrâneo para NW em direcção à foz do rio Ardila (cota aproximada + 80 m), onde afloram as rochas dolomíticas que, no interior do castelo estão a 44.9 metros de profundidade.

Pensa-se que a situação descrita poderá constituir o elemento-chave para a explicação da profundidade excepcional que os fenómenos de carsificação atingem nesta zona, bem como para a comunicação hidráulica entre este aquífero e o da cobertura terciária que se lhe sobrepõe (Aquífero dos Calcários de Moura).

Como pode observar-se no mapa piezométrico deste aquífero (Figura 5), os gradientes são pequenos na zona terminal do mesmo, aumentando na zona central, na principal zona de recarga. Refira-se contudo que, mesmo aqui, não se observaram as oscilações sazonais características de um meio claramente cársico, pois as amplitudes máximas são da ordem dos 5 metros, o que é claramente inferior ao que se verifica noutros aquíferos instalados em formações litoestratigraficamente equivalentes (por exemplo no Sistema Aquífero Estremoz-Cano).

Do ponto de vista físico-químico pode se encontrar a sua caracterização em Costa *et al.* (2005).

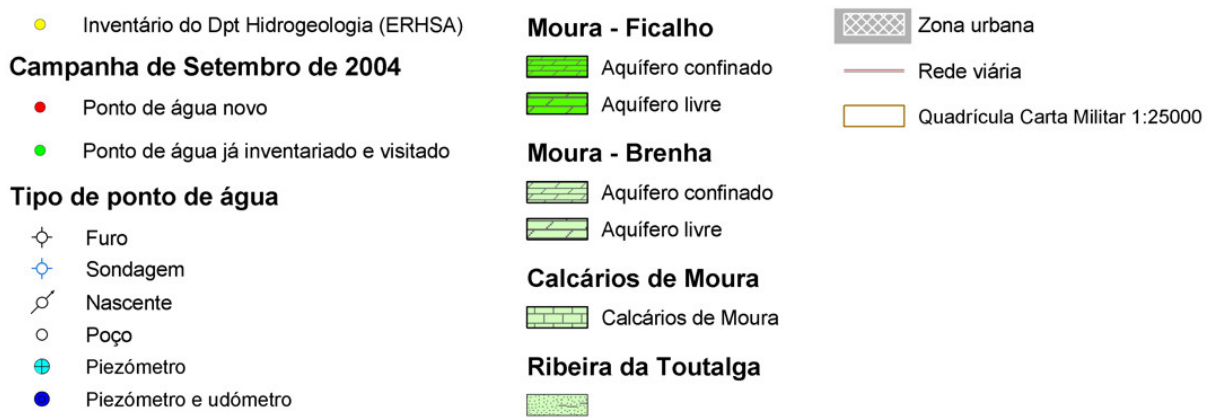
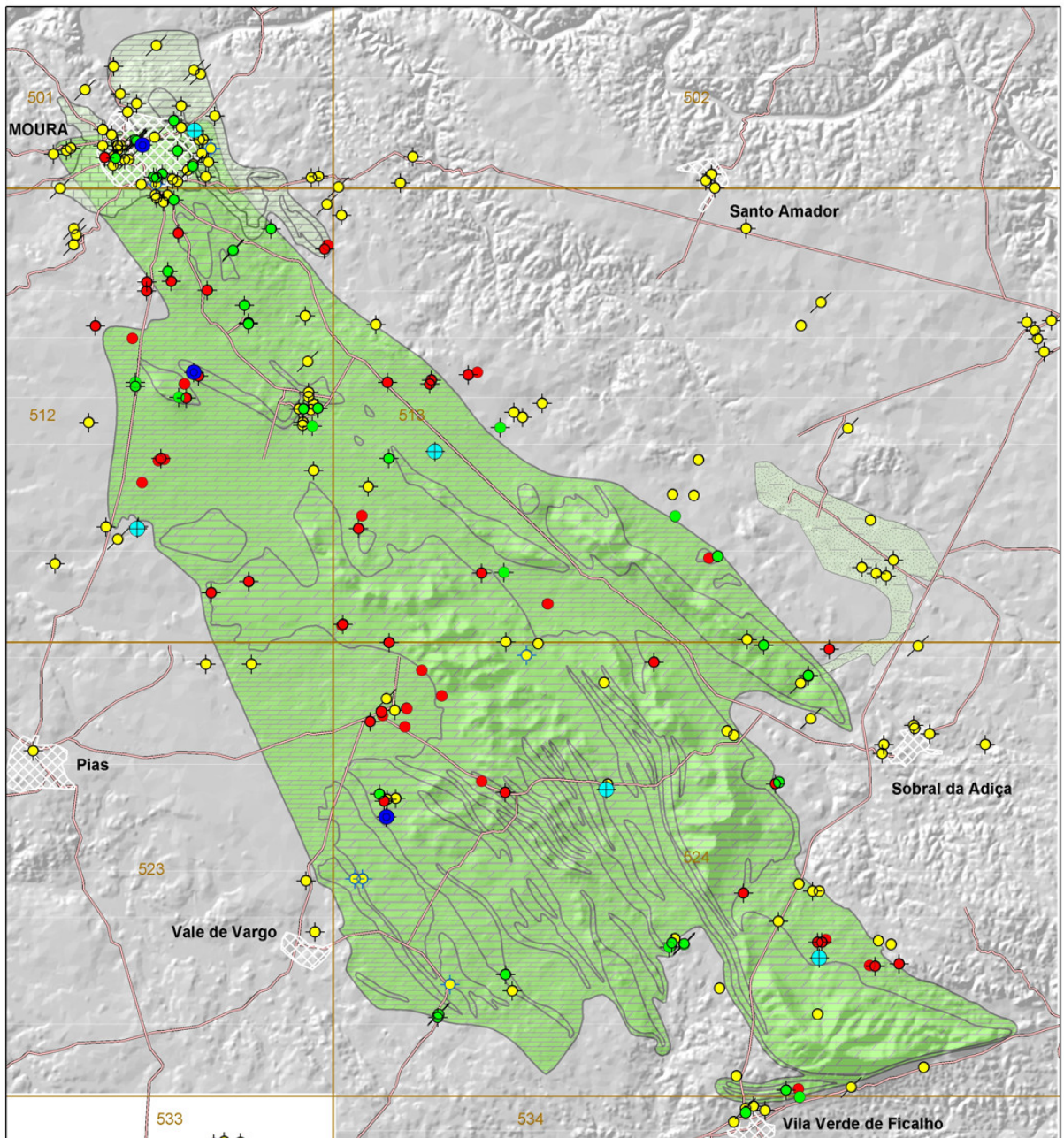


Figura 3– Sistema aquífero de Moura-Ficalho, inventário hidrogeológico e rede de monitorização

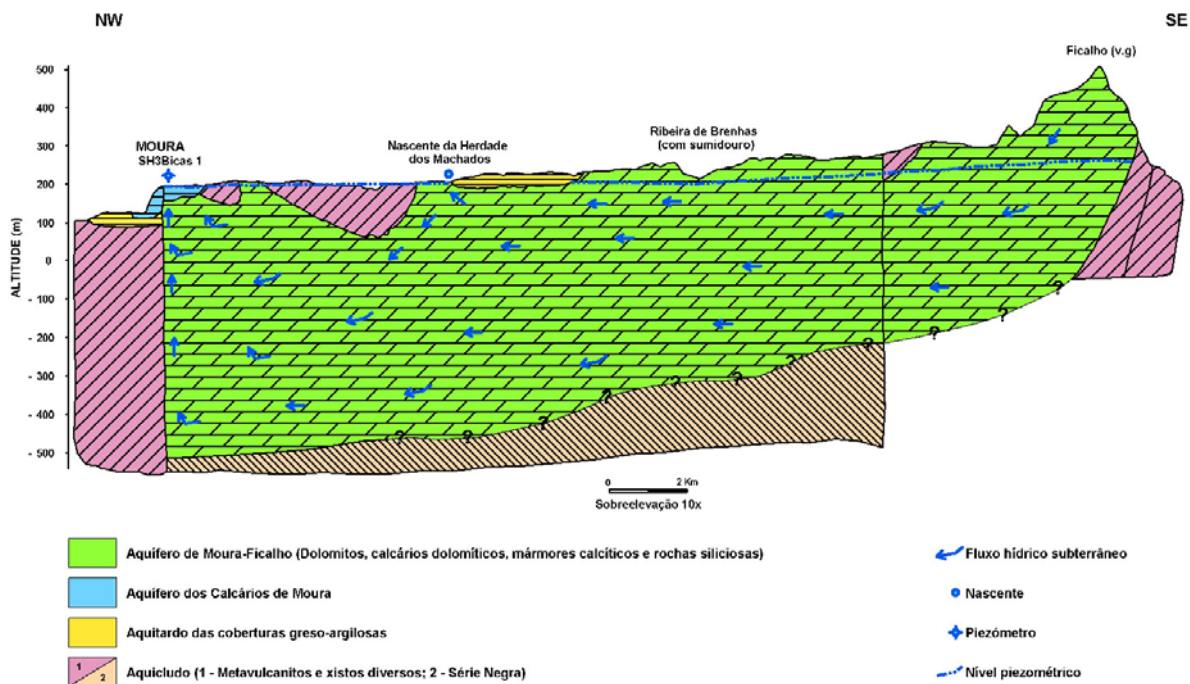


Figura 4 – Perfil hidrogeológico entre Vila Verde de Ficalho e Moura

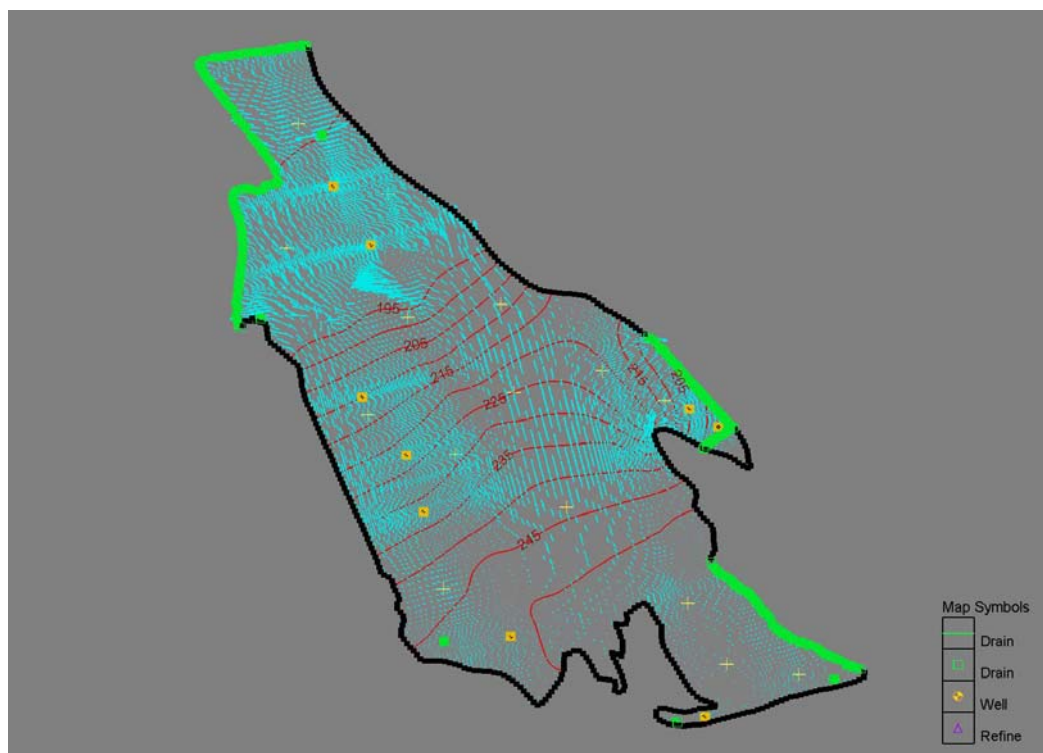


Figura 5 - Piezometria obtida com o modelo simples em regime permanente.

6. MODELAÇÃO

O aquífero Moura-Ficalho é constituído por um conjunto de dobras bastante acentuadas, como se referiu anteriormente. Essencialmente trata-se de três grandes estruturas anticlinoriais NW-SE, tornando-se a espessura menor nas zonas de fecho dessas estruturas e maior nas zonas sinclinais intermédias. A permeabilidade diminui com a profundidade e varia espacialmente, sendo maior nas zonas de descarga do aquífero e menor nas zonas de recarga. O fluxo subterrâneo faz-se essencialmente de SE para NW, embora se identifiquem zonas que contrariam este padrão normal, como sejam as zonas das serras da Preguiça e de Ficalho.

A recarga do aquífero faz-se exclusivamente a partir da precipitação ocorrida sobre o aquífero. Os contornos do aquífero são impermeáveis ou deixam passar água para as formações adjacentes (nascentes ocultas). Não existem quaisquer massas de água exteriores à área do aquífero, susceptíveis de introduzir água neste. A maior parte da área do aquífero corresponde à bacia hidrográfica da Ribeira de Brenhas, dando-se a infiltração, em larga medida, através de aparelhos cársticos como dolinas e algares, mais ou menos encobertos por argilas residuais de dissolução e cascalheiras de calhaus soltos (depósitos plio-quadernários). A infiltração processa-se por circulação de parte da água de precipitação através das fendas e outras aberturas da zona não saturada, eventualmente após um trajecto superficial geralmente curto (inferior a uma ou duas centenas de metros).

A recarga foi estimada temporalmente numa base diária através do modelo unidimensional Extended model for Aquifer Recharge and soil moisture Transport through the unsaturated Hardrock (EARTH, Van der Lee *et al.*, 1990). Este modelo, do tipo lumped, usa métodos determinísticos que representam os fenómenos físicos no solo (equações dos mecanismos de percolação no solo, de distribuição vertical da humidade, de escoamento superficial, de evapotranspiração). Os dados de input obrigatórios são a evapotranspiração potencial e a precipitação diárias. A calibração é efectuada pontualmente (1-D) em vários pontos de observação através de métodos indirectos, baseados nas flutuações do nível piezométrico. O output principal é a recarga eficaz diária, ou seja a parte das águas meteóricas infiltradas que atinge a zona saturada.

Chomba (2004) calculou a recarga em 5 piezómetros usando dados de várias estações meteorológicas do Instituto da Água e do INETI. Os períodos estudados variam entre 6 e 30 meses. Os valores de recarga por piezómetro variam entre 37,8 e 42,4% da precipitação. Está actualmente em curso o estudo da recarga nos mesmos 5 piezómetros para o período compreendido entre Outubro de 2000 e Junho de 2005.

Nos afloramentos de rochas carbonatadas foram definidas zonas preferenciais de recarga através de observações de campo e da análise em SIG das características hidrogeomorfológicas. A distribuição espacial da recarga foi calculada mensalmente através do cruzamento destas áreas preferenciais de infiltração e dos polígonos de Thiessen afectos a várias estações udométricas.

As principais descargas naturais do aquífero consistem em transferências hídricas subterrâneas para as formações adjacentes, essencialmente para os depósitos paleogénicos e miocénicos da zona de Moura e a W e SW desta cidade e para outras manchas cenozóicas e para níveis de metavulcanitos do complexo vulcano-sedimentar de Moura-Santo Aleixo, essencialmente nos flancos orientais da dobras da Preguiça e de Ficalho. As principais nascentes observadas constituem as nascentes de Enfermarias e do Gargalão. Todas estas descargas do aquífero foram representadas por células do tipo dreno (Figura 6), com cotas atribuídas de acordo com os dados existentes.

As outras saídas do aquífero correspondem aos furos de captação de água, essencialmente destinados ao abastecimento público e ao abastecimento agrícola (Figura 6).

Na calibração do modelo numérico de escoamento, foram utilizadas medições de níveis da rede piezométrica que se representa na Figura 1, considerando os registos entre 1/10/2000 e 30/05/2005. Foram ainda considerados os dados existentes sobre caudais de nascentes.

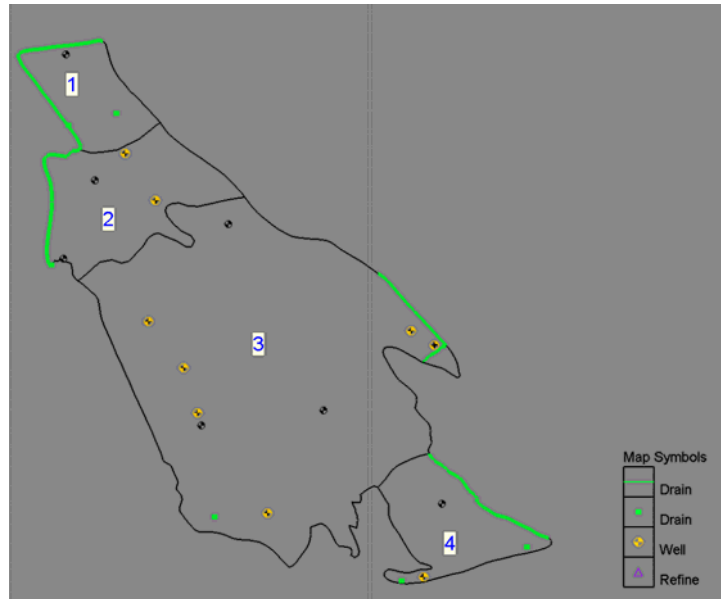


Figura 6 - Elementos considerados no modelo conceptual, com identificação das quatro zonas de permeabilidade e indicação dos drenos e furos considerados.

Fizeram-se duas abordagens distintas no sentido de implementar um modelo numérico de simulação de fluxo deste aquífero, que serão designados por:

- Modelo dobrado, no qual se criou uma malha de células que respeitasse a geometria tridimensional do aquífero;
- Modelo simples, em que se criou uma malha de células de geometria plana horizontal.

Segue-se a apresentação dos resultados alcançados em cada uma destas abordagens, seguindo-se a comparação entre ambas.

6.1. Modelo dobrado

Utilizando as ferramentas informáticas disponíveis no software Groundwater Modeling System (GMS), versão 5.1, articulada com o ArcGis, foi possível gerar uma malha de células de diferenças finitas para o Modflow-2000, com uma forma que pretende representar a discretização tridimensional do aquífero.

No ambiente GMS, uma das formas de gerar uma rede de células de diferenças finitas para o Modflow, consiste em criar sólidos que, posteriormente são utilizados para gerar as malhas. Foram definidos os sólidos que se representam na Figura 7, sendo o sólido amarelo-acastanhado a camada confinante e os sólidos verde e azul as partes, respectivamente superior e inferior do aquífero. O confinante corresponde aos níveis de vulcanitos do topo do Complexo vulcano-sedimentar de Moura-Santo Aleixo e às coberturas cenozóicas, enquanto o aquífero corresponde à fácies carbonatada do mesmo complexo vulcano-sedimentar e das Dolomias de Ficalho. Para se obter esta geometria foram considerados mais de uma centena de "sondagens virtuais" espacialmente distribuídas, contendo esta informação.

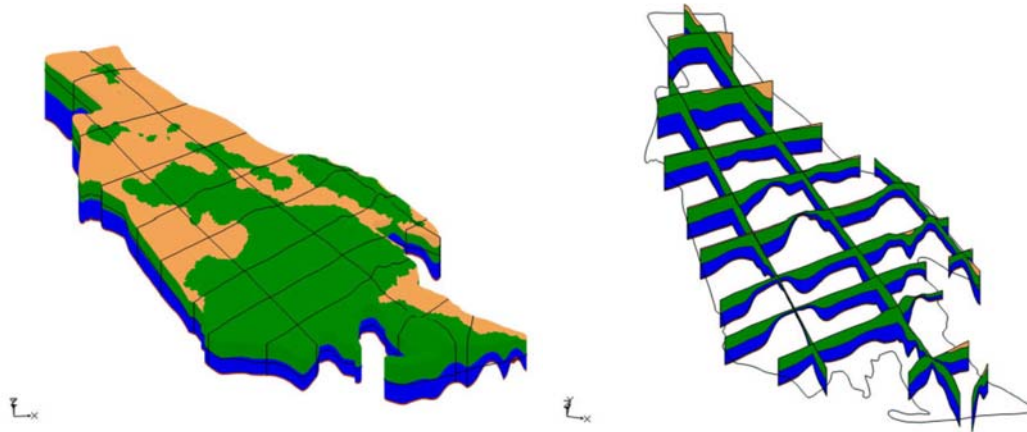


Figura 7 - Sólidos gerados no ambiente GMS, utilizando tins criadas em ArcView.

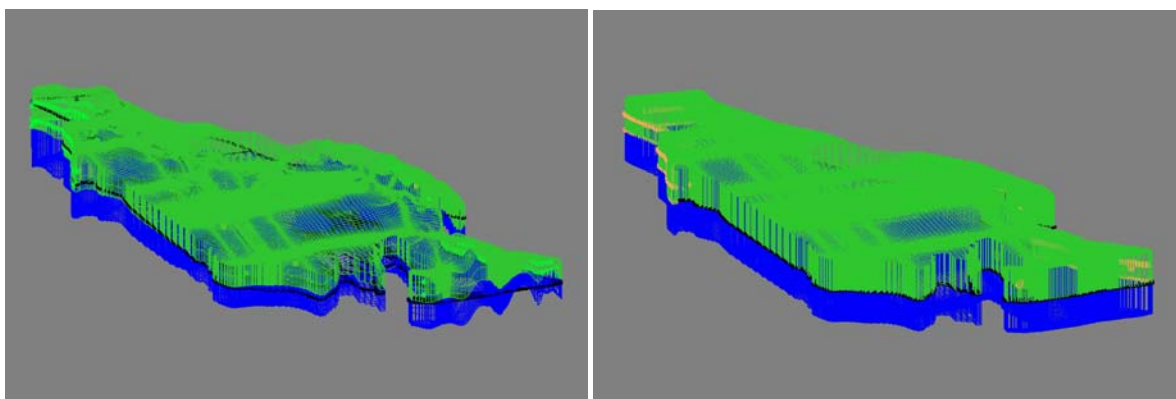


Figura 8 - Malha de células utilizada nos modelos dobrado (esquerda) e simples (direita).

Gerou-se uma malha de células com duas camadas para cada uma das partes, superior e inferior, do aquífero, como se representa na Figura 8. A permeabilidade diminui em profundidade, sendo apenas a camada superior do tipo 3 (LAYCON=3), isto é, do tipo misto livre/confinado, conforme a posição relativa do potencial hidráulico e do tecto do aquífero. As restantes camadas são do tipo 0 (LAYCON=0), isto é, do tipo confinado.

Depois de calibrado este modelo, quer em regime permanente quer em regime transitório, não foi possível melhorar a calibração alcançada por existirem algumas células secas no interior do domínio de simulação. Nestas condições não existe nenhum algoritmo de modelação inversa que permita minimizar os erros. Tanto o PEST como o Modflow PES ou o UCODE, não suportam células secas no domínio de simulação.

As células que secam, pelo menos durante alguns períodos do tempo de simulação, situam-se na camada superior, nas zonas de fecho dos principais relevos. Assim, uma das formas de ultrapassar esta dificuldade consistiu criar um modelo mais simples, plano, como se verá seguidamente.

6.2. Modelo simples

No modelo simples foram apenas consideradas duas camadas, sendo a inferior do tipo confinado e a superior do tipo livre. O topo da camada 1 (superior) situa-se à cota 400 e a base à cota zero. A base da camada 2 situa-se à cota -400. Na Figura 8 representa-se, do lado direito, a malha de células utilizada.

Nestas condições, o topo do aquífero corresponderá à superfície freática e a base é plana horizontal. Alcançou-se uma solução mediante um processo de calibração em regime permanente, considerando os quatro domínios de permeabilidade representados pelos polígonos, de 1 a 4, assinalados na Figura 6.

Depois de se ter obtido uma solução em regime permanente, fez-se a modelação inversa para optimização da permeabilidade da camada 1, utilizando o algoritmo PEST com os chamados "pilot points". Consideraram-se 15 pontos, espacialmente distribuídos e, como resultado, obteve-se o mapa de permeabilidade horizontal que se representa na Figura 9.

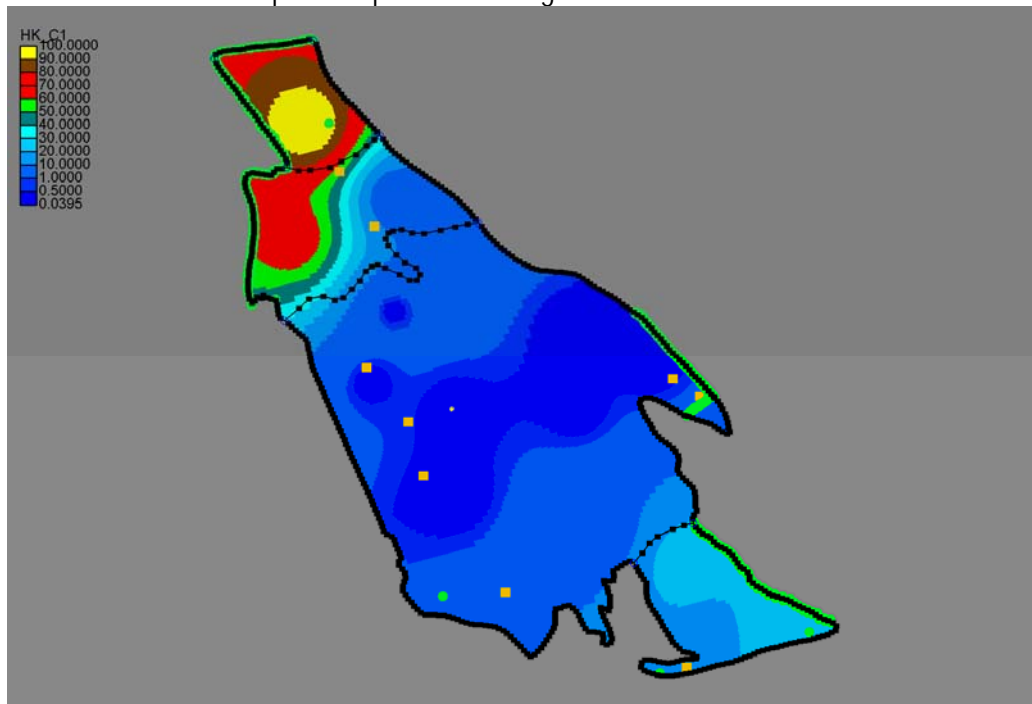


Figura 9 - Mapa de permeabilidade horizontal da camada 1 do aquífero, resultante da modelação inversa com o algoritmo PEST com "pilot points".

Da observação da Figura 9 constata-se que a permeabilidade é muito variável, sendo menor na principal zona de recarga e aumentando para as zonas de descarga do aquífero, o que se afigura como realista, atendendo ao facto de se tratar de uma circulação fortemente condicionada por processos de carsificação. Os valores de transmissividade variam entre alguns m²/d até cerca de 19 000 m²/d, na zona de Fonte da Telha e Enfermarias.

O grau de calibração obtido desta forma é apresentado seguidamente e comparado com o resultado obtido com o modelo mais complexo.

6.3. Comparação entre os dois modelos

Foram introduzidos os valores de recarga até 30/10/2005, considerando-se nula a recarga a partir de então até final do ano civil. Os níveis previstos e observados em cada piezómetro constam da Figura 10. Os caudais das nascentes também foram previstos, mas neste caso existem apenas medições e estimativas pontuais, que estão abrangidas pela variação de caudal simulada.

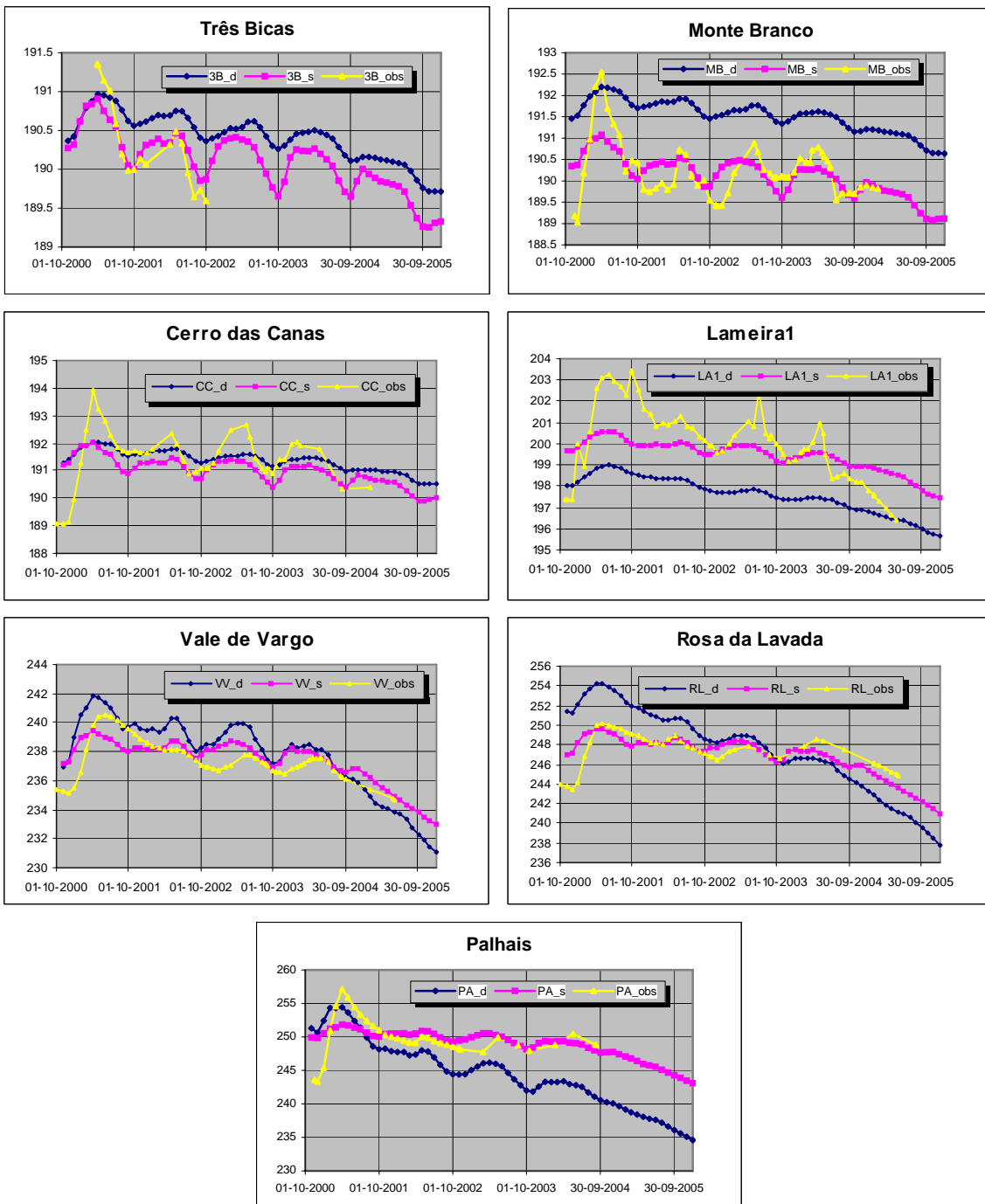


Figura 10 - Níveis piezométricos observados e simulados nos piezómetros.

Quadro 2

	mod. s	mod. d
Mean Error:	2.29	3.021
Mean Abs. Error:	2.599	3.304
Root Mean Sq. Error:	3.09	4.331

Na Figura 10 representam-se os níveis observados e os simulados com o modelo dobrado e com o modelo simples. Os resultados da simulação com o modelo dobrado são identificados pela sigla "d" enquanto os do modelo simples são identificados com a sigla "s", em ambos os casos acrescentadas à sigla que designa o piezómetro. Também no Quadro 2, onde se apresentam os erros associados, se segue este critério de identificação.

Além de se ter alcançado um erro menor no modelo mais simples, pode constatar-se que os níveis simulados para os vários piezómetros ao longo do tempo são muito mais satisfatórios.

Face a estes resultados obtidos com a modelação inversa, considerou-se fundamental tentar melhorar a calibração, sempre com recurso a esta técnica. Assim, já se desenvolveu outro modelo geometricamente mais sofisticado, mas sem células secas, e estão a fazer-se optimizações de permeabilidade e de outros parâmetros hidráulicos, com recurso a técnicas de modelação inversa (essencialmente os algoritmos PEST e Modflow PES).

7. BIBLIOGRAFIA

Chomba, A. – "Recharge estimate in Moura-Ficalho Aquifer using EARTH Model". Library of International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation in Enschede, The Netherlands, 2004, 59 p.

Costa, A. M. *et al.* – "Monitorização dos Aquíferos da Região de Moura-Ficalho - sondagens, construção e equipamento de piezómetros", in 4º Congresso da Água, Lisboa, 1998, pp. 181-182.

Costa, A. M. - "Sistema Aquífero Moura-Ficalho". Anexo II - Fichas dos Sistemas Aquíferos do Alentejo do Relatório Técnico do Projecto de Estudo dos Recursos Hídricos Subterrâneos do Alentejo. CCRA, Évora, 2001, 130 p.

Costa, A. M. *et al.* – "Estudo Hidrogeoquímico do Sistema Aquífero Moura-Ficalho", in 8º Congresso da Água, 2005.

Harbaugh, A.W. *et al.* - "MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey modular ground-water model -- User guide to modularization concepts and the Ground-Water Flow Process: U.S. Geological Survey Open-File Report 00-92, 2000, 121 p.

Hendrickx *et al.* – "Water flow process in arid and semi-arid vadose zones, in Understanding Water in a Dry Environment, IAHR n°23, 2003, pp. 151-209

Lubczynski M. W. and Gurwin J. – "Integration of various data sources for transient groundwater modeling with spatio-temporally variable fluxes – Sardon study case, Spain", Journal of Hydrology (article in press), 2005

Lubczynski, M.W. – "Ground water evapotranspiration - underestimated component of groundwater balance in a semiarid environment—Serowe case Botswana", Groundwater: Past Achievements and Future Challenges. Balkema, Rotterdam. ISBN 9058091597, 2000, pp. 199–204.

Oliveira, J. T. *et al.* – "Traços gerais da evolução tectono-estratigráfica da Zona de Ossa Morena", em Portugal. Cuad. Lab. Xeol. Laxe, 16, La Coruña, pp. 221-250.

Piçarra, J. M. – "Descoberta de graptólitos silúricos em liditos da Formação dos «Xistos de Moura», Maciço de Évora-Beja: Implicações tectono-estratigráficas", in Resumos da XI Reunião sobre a «Geologia do Oeste Peninsular», Huelva, 1991, pp. 34-35.

Van der Lee, J., Gehrels, J. - Modelling Aquifer Recharge– Introduction to the Lumped Parameter Model EARTH. Free University of Amsterdam, The Netherlands, 1990, 31 p.