

MODELAÇÃO DE RELAÇÕES ENTRE ÁGUAS SUPERFICIAIS E SUBTERRÂNEAS NOS AQUÍFEROS DO ALGARVE CENTRAL

José Paulo MONTEIRO

Hidrogeólogo, Universidade do Algarve, Campus de Gambelas, 8000 FARO, jpmonte@ualg.pt

José MATOS SILVA

Engº Civil, Instituto Superior Técnico, jmsilva@civil.ist.utl.pt

Paula GUERREIRO

Lic. Gestão Territorial e Urbana, Mestranda no Instituto Superior Técnico, paulag@civil.ist.utl.pt

João MARTINS

Engº do Ambiente, Universidade do Algarve, Campus de Gambelas, 8000 FARO, joaoambiente@gmail.com

Edite REIS

Hidrogeóloga, Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Algarve, ereis@ccdr-alg.pt

RESUMO

A grande diversidade de litologias presentes no Algarve é responsável por interações muito diversificadas e complexas entre águas superficiais e subterrâneas. Apesar disso, o conhecimento acerca da hidrologia superficial e da hidrogeologia desta região tem evoluído de forma relativamente independente. No entanto, existem nos diversos estudos hidrogeológicos que foram efectuados nas últimas décadas no Algarve, numerosas referências acerca da localização e características dos locais onde se estabelece conexão hidráulica entre águas subterrâneas e águas superficiais. Sob o ponto de vista hidrogeológico, o interesse prático da referenciação destes locais, bem como a caracterização das relações "águas subterrâneas-águas superficiais" que neles se estabelecem, tem um interesse prático imediato: a definição das condições de fronteira que permitem interpretar o funcionamento hidráulico dos grandes reservatórios dinâmicos de água subterrânea que são os sistemas aquíferos. No presente texto sintetiza-se brevemente parte do conhecimento existente sobre as interações entre as águas subterrâneas e superficiais no Algarve central e apresentam-se alguns resultados preliminares de modelos de escoamento que constituem uma primeira tentativa de simular a sua ocorrência. A fiabilidade dos resultados obtidos é difícil de avaliar, sobretudo porque os dados existentes para calibrar e validar as simulações efectuadas são insuficientes. Por outro lado, a realização dos exercícios de modelação apresentados permite a definição de um conjunto de acções que, a ser empreendidas, poderão contribuir para melhorar a compreensão das relações entre as águas subterrâneas e superficiais no Algarve.

Palavras-chave: modelação de relações rio-aquífero



1 - INTRODUÇÃO

A tradicional separação entre o estudo das águas superficiais e subterrâneas não se encontra exclusivamente nas instituições do nosso país. Pelo contrário, é actualmente assumida como um problema à escala global. Esta realidade está mais relacionada com as dificuldades associadas à definição de relações quantitativas entre estes componentes do ramo terrestre do ciclo hidrológico do que com a ausência de necessidade de gerir de forma integrada as águas subterrâneas e superficiais. A directiva 2000/60/CE, normalmente referida como "directiva quadro da água" bem como diversos documentos técnicos e institucionais de países de outras regiões do mundo, como por exemplo os Estados Unidos da América (Winter *et al.*, 1998) e a Austrália (Braaten & Gates, 2001), fazem apelo ou argumentam sobre a pertinência prática e a inevitabilidade técnica da gestão da água ter de passar a fazer-se recorrendo à gestão conjunta dos recursos hídricos subterrâneos e superficiais.

Relativamente ao Algarve, existem referências à hidrogeologia regional a partir da década de 80. TRAC (1981) apresentou uma síntese de numerosas contribuições técnicas num trabalho em que é proposta a definição de dez unidades hidrogeológicas: um sistema correspondente às formações metamórficas Paleozóicas que ocupam cerca de 3300km² na área Norte do Algarve; cinco sistemas correspondentes às formações essencialmente Jurássicas do Barrocal e quatro correspondentes às formações miocénicas e mais recentes do litoral. Actualmente (Almeida *et al.*, 2000), estão identificados 17 sistemas aquíferos com expressão regional nesta região. No que respeita ao Algarve central, as primeiras alusões aos locais onde foram identificadas relações entre águas subterrâneas e superficiais, ainda nos anos 80, foram feitas por Almeida (1985) e Silva (1988). Para o trabalho referido no presente artigo, para além dos elementos existentes nestes trabalhos, foram ainda utilizados dados recolhidos no campo pela Eng^a Edite Reis da CCDR Algarve em Julho e Agosto de 1997.

2 - LOCALIZAÇÃO DE LOCAIS IDENTIFICADOS COM TRANSFERÊNCIAS ÁGUA SUBTERRÂNEA-ÁGUA SUPERFICIAL NO ALGARVE CENTRAL

Uma visita ao campo no barrocal (aqui considerado como a área do Algarve ocupada por rochas carbonatadas jurássicas), em diferentes períodos do ano hidrológico, mostra que, nesta área, as ribeiras alternam, sucessivamente, troços influentes (que contribuem para a recarga dos aquíferos subjacentes) e efluentes (em que recebem água subterrânea, a partir de emergências no seu leito). Usando uma linguagem informal, os percursos das ribeiras no barrocal constituem verdadeiros "curto-circuitos" do escoamento subterrâneo em pontos e áreas onde o nível freático intercepta a superfícies topográfica (nascentes) e onde há sumidouros que propiciam a infiltração da água escoada no leito das ribeiras.

O volume escoado nestas entradas e saídas, sucessivas, ao longo das ribeiras nunca foi monitorizado até à actualidade pois, no fundo, este volume pode ser incorporado nas estimativas totais de escoamento subterrâneo. A excepção são as nascentes mais importantes, através das quais o volume de água é suficientemente importante para ser "exportado" para outro sistema aquífero. Por exemplo, em casos como a Nascente de Paderne que "exporta" água do sistema Querença-Silves para os Sistemas Aquíferos de Albufeira-Ribeira de Quarteira e de Quarteira. Mesmo nestes casos, as medições de caudal ainda hoje têm regularidade mensal, contrastando com as medidas diárias de caudal efectuadas nas nascentes deste tipo na maioria dos países da Europa há décadas. Na **Figura 1**, representam-se os locais onde se verificam transferências entre águas subterrâneas e superficiais. Neste caso, apenas se apresentam os locais onde se verificam entradas ou saídas importantes e não os sucessivos locais onde se verificam transferências com significado local, pouco importantes como já se referiu, ao nível das necessidades que se colocam à interpretação do funcionamento hidráulico dos aquíferos à escala regional.

Relativamente à Ribeira do Algibre, tal como muitas outras ribeiras, esta muda de denominação diversas vezes ao longo do seu percurso (Resulta inicialmente da confluência das Ribeiras dos Moinhos e Ribeira do Rio Seco, tomando a denominação de Ribeira da Menalva, depois do Algibre e, finalmente, a jusante da confluência com a Ribeira de Alte, de Ribeira de Quarteira, até ao oceano na Marina de Vilamoura). Os dois primeiros cursos de água referidos têm cabeceira ainda nas formações paleozóicas pouco permeáveis, onde a infiltração é muito baixa. Ao atingirem o limite com a formação carbonatada, é provável que uma parte significativa do seu caudal se infiltre, devido à capacidade de infiltração, muito maior nas rochas carbonatadas do que nos xistos e grauvaques. Alguns destes pontos, como o localizado a W do Cerro da Corte e a 100 metros da confluência do ribeiro Seco com o Salgado, ou na Ribeira da Quinta do Freixo, são apenas alguns dos pontos do sistema aquífero Querença-Silves onde ocorre recarga concentrada alóctone, ou seja, infiltração em pontos bem definidos, junto aos limites do aquífero, onde se infiltram águas de escorrência superficial, oriundas de precipitação, ocorrida nas bacias hidrográficas de ribeiras, nos seus troços a montante dos limites do aquífero. Verifica-se que após estes pontos de recarga concentrada nos leitos das ribeiras, junto aos limites Norte do sistema aquífero (cuja posição não está representada no corte da **Figura 2**), são identificáveis no terreno um grande número surgências no leito da Ribeira do Algibre.

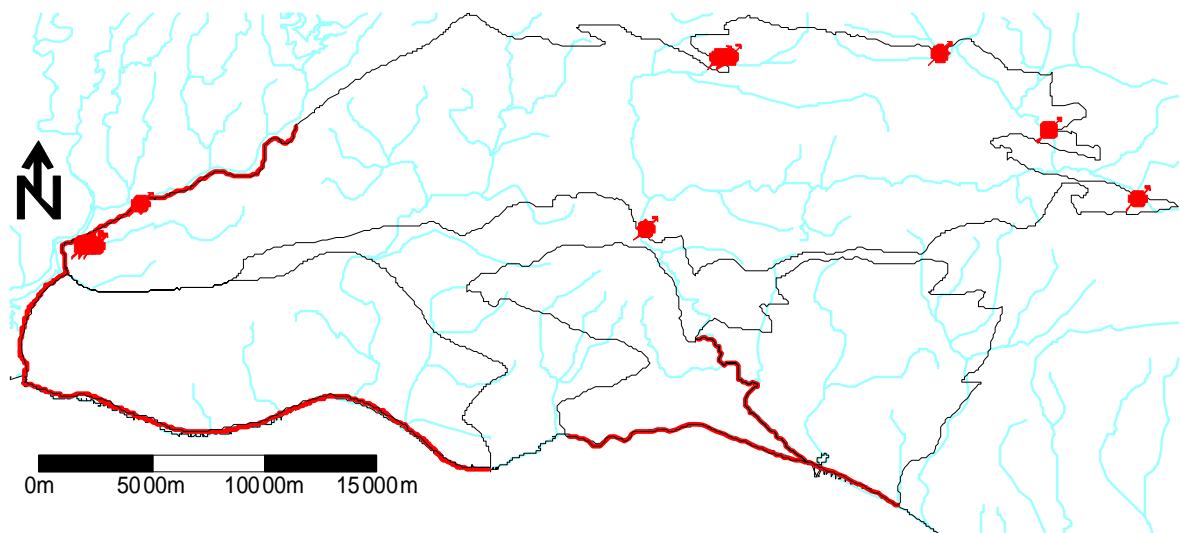


Fig. 1 – Rede hidrográfica do Algarve central representada conjuntamente com os três sistemas aquíferos identificados nesta área: Querença-Silves (em cima); Ferragudo Albufeira (em baixo à esquerda), Albufeira-Ribeira de Quarteira e Quarteira (estes dois últimos, à direita, partilham a Ribeira de Quarteira como uma das suas principais áreas de descarga). Os alinhamentos (troços de ribeiras e limite continente-oceano) e pontos (nascentes) marcados a vermelho representam os locais onde se estabelecem transferências entre os aquíferos e a superfície. Neste caso, quase sempre emergência de águas subterrâneas (adaptado de Monteiro *et al.*, 2003).

O primeiro ponto de surgência de água subterrânea, representado pela flecha mais à esquerda na **Figura 2**, corresponde à Fonte Benémola. Apesar de poderem ser outras as razões pelas quais se explica que, neste troço da ribeira, ocorrem numerosas emergências de águas subterrâneas, é possível que estas se relacionem com a possibilidade do declive do terreno ser, nesta área, superior ao declive da superfície equipotencial do aquífero que nesta área se encontra acima da cota do terreno. Estas condições deixam de se verificar no troço da ribeira, com cerca de 3 km que se segue, onde ocorre um conjunto de sumidouros, como representado pelas flechas que apontam para baixo na **Figura 2**.

Relativamente ao troço terminal da ribeira (no qual esta é denominada Ribeira de Quarteira), este constitui o limite entre os sistemas aquíferos de Albufeira Ribeira de Quarteira e de Quarteira. De acordo com as observações de Silva (1988), a Ribeira de Quarteira tem comportamento influente até à Ponte do Barão, local onde se inicia o seu comportamento efluente que se estende depois para Jusante. Uma análise cuidadosa e exaustiva deste tipo, para cada uma das ribeiras no seu percurso sobre os sistemas aquíferos do Barrocal, é um dos aspectos que tem de ser necessariamente tido em conta para a definição do local de implantação de açudes para potenciar a recarga. Deve ter-se em conta que as infiltrações nestes locais podem atingir valores da ordem das várias centenas de litros por segundo, nos períodos de ocorrência de precipitação.

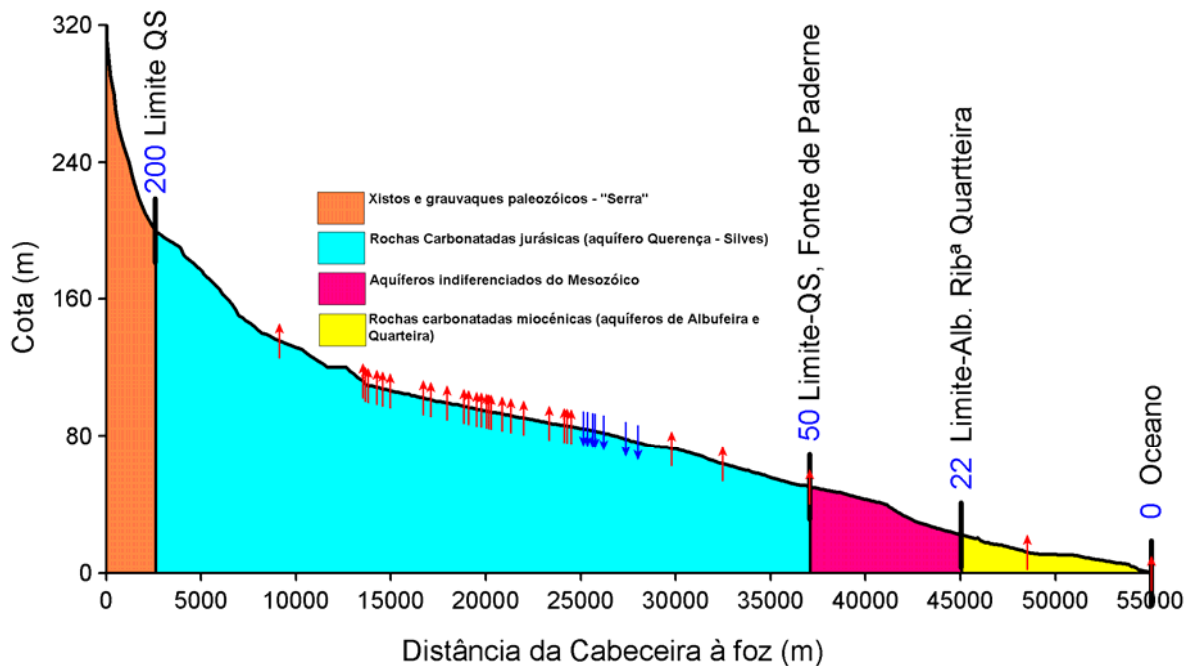


Fig. 2 – Perfil de altitude da Ribeira do Algibre. Os pontos de surgência e sumidouros, representados pelas flechas que apontam para cima e para baixo (respectivamente), correspondem a observações de campo efectuadas pela Eng^a Edite Reis em Julho e Agosto de 1997. As cores representam, simplificada, a natureza dos terrenos sobre os quais escoam a Ribeira do Algibre.

3 - MODELAÇÃO DAS RELAÇÕES HIDRÁULICAS ENTRE O SISTEMA AQUÍFERO QUERENÇA-SILVES E A REDE HIDROGRÁFICA DO ALGARVE CENTRAL

As transferências de água entre os aquíferos e as ribeiras que lhe estão hidráulicamente ligadas dependem das relações definidas pela distribuição espacial dos potenciais hidráulicos em ambos (como implicitamente ficou referido quando da discussão da **Figura 2** na secção anterior). Assim, uma vez que os modelos de escoamento de águas subterrâneas, actualmente existentes para os aquíferos do Algarve central, permitem simular, com uma precisão bastante razoável, os potenciais hidráulicos associados às águas subterrâneas, estes valores foram comparados com o potencial hidráulico nas ribeiras (que, para este fim, foi estimado considerando o seu valor equivalente ao das cotas do leito das ribeiras). Deste modo, foi possível obter uma primeira estimativa grosseira do tipo de transferências que ocorreria entre rios e aquíferos, em nó do modelo, caso toda a extensão das ribeiras estivesse em conexão hidráulica com os sistemas aquíferos subjacentes. Este exercício, apesar de muito simplista reveste-se de interesse como primeira etapa de simulação das relações rio-aquífero e contribui para que se definam estratégias para aprofundar a compreensão deste problema. Ver-se-á mais adiante, de que modo pode ser aprofundado o rigor desta primeira tentativa de modelação do fenómeno em estudo.

3.1 - Distribuição do potencial hidráulico no sistema aquífero Querença-Silves à escala regional

A **Figura 3** ilustra a os mapas de isopiezas calculadas a partir dos 34 pontos de observação usados no terreno para controlo piezométrico do sistema aquífero Querença-Silves monitorizados pelas CCDR Algarve e os resultados de potencial calculados nos 11663 nós de um modelo em elementos finitos apresentado em Monteiro *et al.* (2006a e 2006b).

Os resultados ilustrados na **Figura 3**, correspondem a uma simulação, em regime permanente, obtida a partir de uma distribuição espacial de valores de transmissividade obtida por calibração inversa. Na realidade, as variantes mais actuais deste modelo conseguem uma previsão do sistema aquífero mais fiável do que aquela que aqui se apresenta. As condições de recarga simuladas neste caso, correspondem a uma taxa de infiltração de 43% da precipitação anual média, verificada para a série 1959/60-1990/91 na área do sistema aquífero. Obtém-se assim um escoamento anual médio de $93 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$, para os cerca de 324 km^2 de área do sistema aquífero de Querença-Silves.

3.2 – Simulação das relações hidráulicas entre a rede hidrográfica e o aquífero

A primeira aproximação à análise das relações hidráulicas entre o sistema aquífero de Querença-Silves e a rede hidrográfica consistiu na definição de potenciais impostos como condições de fronteira nos nós do modelo em elementos finitos, correspondentes à localização das ribeiras. Os potenciais impostos correspondem aos valores de cota da rede hidrográfica extraídos da carta de escala 1:25000 do Instituto Geográfico do Exército. Nestas condições, verifica-se a ocorrência de tipos de situações: (1) o potencial hidráulico imposto, de acordo com a cota a que se encontra a ribeira, é maior que o potencial calculado para as águas subterrâneas pelo modelo para esse ponto. Neste caso é simulada transferência da ribeira para o aquífero nesse ponto ou; (2) a cota da ribeira é inferior ao potencial calculado pelo modelo para a água subterrânea nesse ponto. Neste segundo caso, é simulada uma transferência do aquífero para a ribeira.

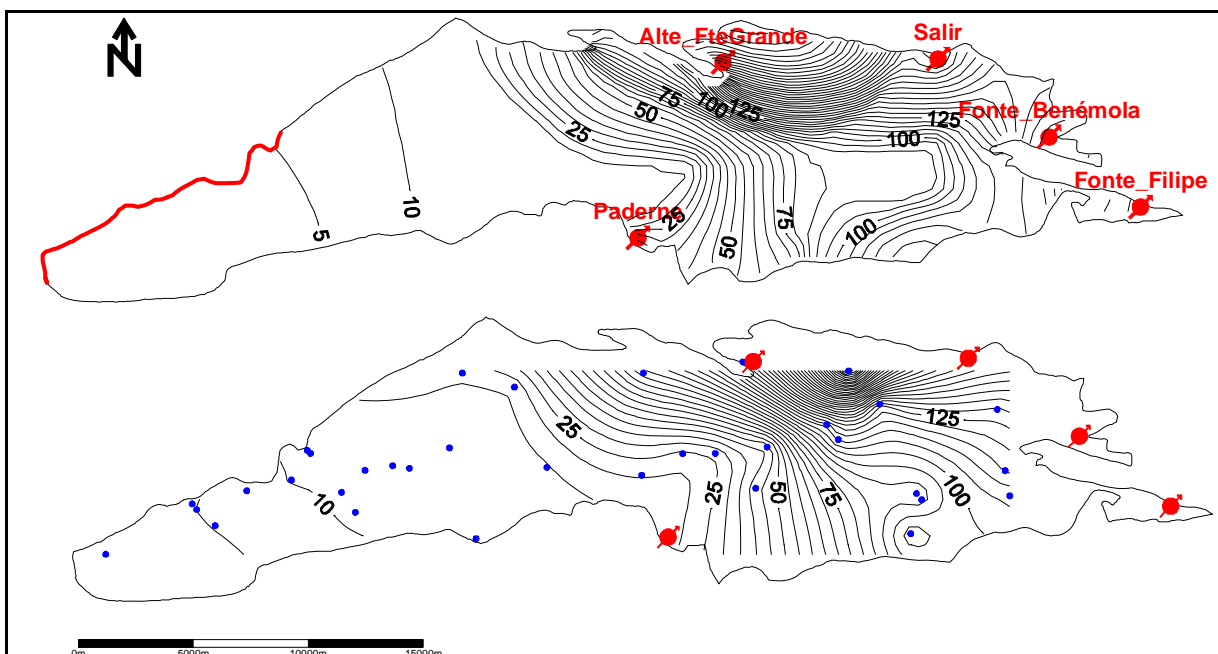


Fig. 3 – Comparação de mapas de potencial hidráulico construídos para o sistema aquífero de Querença-Silves com dados de campo (em baixo) e simulados matematicamente com um modelo em elementos finitos (acima).

O resultado da distribuição dos nós do modelo, para cada uma das situações 1 (ribeira influente) e 2 (ribeira efluente) ilustra-se na **Figura 4**. Este exercício de análise das relações rio-aquífero é preliminar

e constitui o primeiro passo de um trabalho de investigação que se pretende desenvolver. Na próxima secção discute-se a razão pela qual a definição de condições de fronteira mais realistas é o aspecto no qual se centrarão os esforços do trabalho a desenvolver nas próximas etapas.

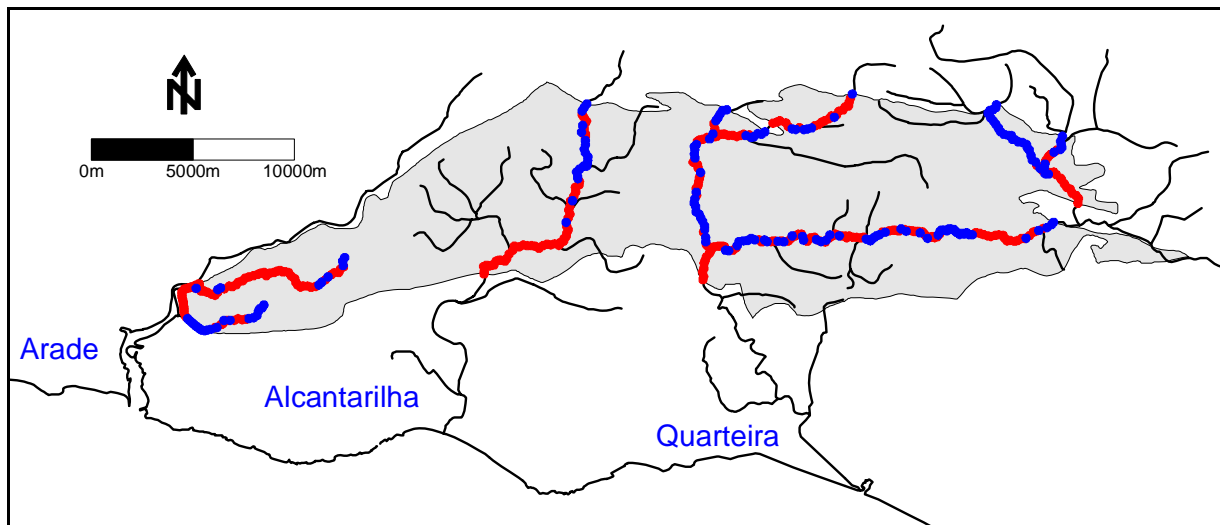
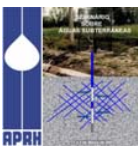


Fig. 4 – Localização dos nós influentes (azul) e efluentes (vermelho), de acordo com a relação entre o potencial calculado para as águas subterrâneas e estimado para as ribeiras, de acordo com a sua cota. Simulações efectuadas com um modelo em elementos finitos.

3.3 – Necessidades de diversificação das condições de fronteira e trabalho experimental

O procedimento para identificação dos nós efluentes e influentes, descrito na secção anterior, cujo resultado se ilustrou na **Figura 4**, é pouco realista por diversas razões. Em primeiro lugar, assume-se que existe conexão hidráulica em toda a extensão do leito das ribeiras com o sistema aquífero o que não corresponde á realidade. Além disso, acrescenta-se ainda que, no caso de os potenciais serem a favor da transferência ribeira-aquífero, a ribeira fornece, de acordo com o modelo, água indefinidamente (o que não acontece pois esta acaba por secar). Por outro lado, nos locais onde não há conexão hidráulica, as ribeiras podem ser influentes (através da zona não saturada) ou não haver transferências. No entanto, não pode haver saídas do aquífero para a ribeira. Nestes locais é pois necessário impor uma condição restritiva, por exemplo do tipo “o nó do modelo só funciona no caso do gradiente se verificar a favor da situação fisicamente possível”. Este tipo de restrições às condições de potenciais impostos é usado também, por exemplo, no caso das nascentes (para evitar o contrário do atrás descrito, ou seja que as nascentes injectem água nos aquíferos quando o potencial calculado passa a ser menor do que o valor da sua cota (situação que também não se verifica pois, neste caso, as nascentes “reais” limitam-se a secar).

O problema de modelar a situação que realmente se verifica não é em si impeditivo de se avançar na definição de soluções mais realistas do que as até agora usadas neste trabalho. De facto, a definição de condições de fronteira pode obedecer a condições técnicas bastante mais sofisticadas do que as duas aqui descritas. Todos os exemplos atrás exemplificados se incluem nas chamadas condições de “potencial imposto”, também denominadas de primeiro tipo ou ainda do “tipo *Dirichlet*”. Existem, por outro lado situações em que é preferível impor o volume de escoamento (caso este seja conhecido) e, pelo contrário, estimar os potenciais em função do valor das transferências. Se, por exemplo, existirem troços em que venha a ser medido o caudal, poderá ser este o tipo de condições a impor (fala-se, neste caso em condições de segundo tipo ou de *Neumann*). Sem a pretensão de se discutir de forma profunda a abordagem que se pretende efectuar ao nível da definição das condições de fronteira, refere-se ainda que, no caso em análise, se encontra em curso a aplicação de condições



de fronteira de terceiro tipo, considerando a existência de condições de transferência diferenciadas para as entradas e saídas, de acordo com os valores de potencial, o que corresponde a condições de fronteira de terceiro tipo, também denominadas de *Cauchy*. Pode-se assim incluir um parâmetro que tem em conta o efeito da colmatação do leito da ribeira em certos sectores, o que pode provocar uma resistência diferenciada à entrada e saída de água. Uma discussão da pertinência da aplicação de diferentes tipos de condições de fronteira à simulação de transferências rio-aquífero é apresentada em Reilly (2001). No entanto, independentemente dos resultados que venham a ser obtidos recorrendo a diferentes estratégias de modelação, é essencial que se defina um programa experimental de recolha de dados no terreno que permita calibrar e validar as simulações que se vão efectuar.

4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

O aprofundamento da compreensão das relações entre as águas subterrâneas e superficiais no Algarve está numa fase muito inicial do seu desenvolvimento. Para além do seu interesse puramente científico, o investimento nesta área do conhecimento permite igualmente antever diversos benefícios práticos. Uma aplicação prática que poderia beneficiar de forma imediata de investigação realizada neste domínio poderia ser a identificação dos locais mais adequados para estimular a recarga de aquíferos. Existem no entanto diversos aspectos que poderiam também beneficiar do aumento da compreensão das relações entre águas subterrâneas e superficiais. Por exemplo, a compreensão de fenómenos que estão na origem da definição da distribuição espacial da qualidade da água. Recorde-se que alguns fenómenos que não chegaram a ser abordados no presente artigo, como o é o caso da intrusão salina nos aquíferos, estão directamente relacionados com a ocorrência de relações entre águas subterrâneas e superficiais, modificadas pelo regime de exploração da água.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se à Fundação para a Ciência e a Tecnologia o financiamento concedido, através do projecto "POCTI/AMB/57432/2004 - Modelação de Escoamento Subterrâneo e Optimização de Redes de Monitorização à Escala Regional em Aquíferos Costeiros - O caso do Algarve" – ao abrigo do qual se desenvolveram os modelos cuja utilização se descreve no presente artigo.

BIBLIOGRAFIA

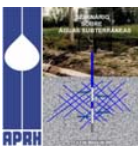
ALMEIDA, C. (1985) Hidrogeologia do Algarve Central. Diss. para obt. do grau de Doutor em Geologia. Departamento de Geologia da FCUL, Lisboa. 333pp.

ALMEIDA, C.; MENDONÇA, J.L.; JESUS, M.R.; GOMES, A.J. (2000) Sistemas Aquíferos de Portugal Continental, Relatório. INAG. Lisboa. Doc. Elect. CD-ROM.

BRAATEN, R.; GATES, G. (2001) Groundwater - Surface Water Interaction in Inland New South Wales: a Scoping Study. Water Sci. Technol. 48/7. pp 215-224

MONTEIRO, J. P.; NUNES, L.; VIEIRA, J.; MARTINS, R.R.; STIGTER, T.; SANTOS, J.; REIS, E. (2003) Síntese Bidimensional dos Modelos Conceptuais de Funcionamento Hidráulico de Seis Sistemas Aquíferos do Algarve (Baseada em Modelos Numéricos de Escoamento Regional). in Ribeiro L. & Peixinho de Cristo F. (eds.) *As Águas Subterrâneas no Sul da Península Ibérica*. Assoc. Intern. Hidrog. APRH publ., Lisboa. pp159-169.

MONTEIRO, J.P.; VIEIRA, J.; NUNES, L.; YOUNES, F. (2006a) Inverse Calibration of a Regional Flow Model for the Querença-Silves Aquifer System (Algarve-Portugal). Integrated Water Resources



Management and Challenges of the Sustainable Development. International Association of Hydrogeologists, IAH. Marrakech. pp 44, doc. Elect. CD-ROM - 6pp.

MONTEIRO, J. P.; RIBEIRO, L.; MARTINS, R.; MARTINS, J.; BENTO, L. (2006b) Monitorização e Modelação dos Aquíferos Costeiros do Algarve/ Monitoring and Modelling of the Algarve Coastal Aquifers. Actas do VII Congresso Nacional de Geologia. Sociedade Geológica de Portugal. Vol. II, pp 557-560

REILLY, T.E. (2001) System and Boundary Conceptualization in Ground-Water Flow Simulation. Techniques of water-Resources Investigations of the United States Geological Survey. Book 3, Applications of Hydraulics. Reston, Virginia. 30 pp.

SILVA, M. L. (1988) Hidrogeologia do Miocénico do Algarve. Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Geologia. Departamento de Geologia da FCUL. Lisboa, 396 pp.

TRAC, N.Q., coord. (1981) Evaluation des Ressources en Eaux des Systèmes Aquifères de L' Algarve - Relat. PNUD. ONU, DGRAH, Portugal, 1981, 112pp.

WINTER, T.C.; HARVEY, J.W.; FRANKE, O.L.; ALLEY, W.M. (1998) Ground Water and Surface Water. A Single Resource. U.S. Geological Survey Circular 1139. Denver, Colorado. USA. 79pp