

# MODELAÇÃO MATEMÁTICA EM AQUÍFEROS COSTEIROS. Aplicação a dois casos de estudo em países africanos: Angola e Tunísia

**Patrícia TERCEIRO**

*Mestre em Hidráulica e Recursos Hídricos, Núcleo de Águas Subterrâneas, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, aterceiro@lnec.pt*

**Luís G. S. OLIVEIRA**

*Mestre e Engenheiro do Ambiente, Núcleo de Águas Subterrâneas, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, loliveira@lnec.pt*

**João Paulo LOBO FERREIRA**

*Doutor em Engenharia Civil, Núcleo de Águas Subterrâneas, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, lferreira@lnec.pt*

**Gabriel LUÍS MIGUEL**

*Director Nacional de Desenvolvimento Tecnológico de Angola, Doutor em Ciências Ambientais e Professor Auxiliar do Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade Agostinho Neto, Luanda, Angola, [gabrielmig@gmail.com](mailto:gabrielmig@gmail.com)*

**Noureddine GAALOUL**

*Ph.D., Water Sciences Technology, Researcher I.N.R.G.R.E.F., Rue Hédi Karray . B.P.10 - 2080 Ariana – Tunisie, gaaloul.noureddine@iresa.agrinet.tn*

**Erika da Justa Teixeira ROCHA**

*Eng.ª Civil, Doutoranda na Universidade Federal do Ceará (UFC), Av. da Universidade, 2853, Benfica – Fortaleza, Brasil, Bolseira da CAPES, no LNEC, Maio/Agosto de 2009, erikadajusta@gmail.com*

## RESUMO

A intrusão marinha em aquíferos costeiros é um dos fenómenos que influencia a qualidade da água subterrânea nas áreas afectadas pela subida do nível médio do mar. Entre as causas deste fenómeno destaca-se a sobre-exploração destes aquíferos, o que resulta num rebaixamento significativo do nível piezométrico e na conseqüente deterioração da água doce. Os aquíferos costeiros Quelo-Luanda (Angola) e da Península de Cap Bon (Tunísia) encontram-se sujeitos a este problema.

Assim, no que respeita à correcta gestão e protecção dos recursos hídricos subterrâneos, é de todo o interesse desenvolver ferramentas robustas de apoio à decisão, como por exemplo a modelação matemática. A modelação de ambos os aquíferos foi realizada utilizando o programa FEMWATER, modelo tridimensional de elementos finitos, que permite simular tanto o escoamento como o transporte de massa nas zonas saturada e não saturada.

O trabalho desenvolvido permitiu analisar não só o comportamento dos aquíferos em estudo, como também identificar a viabilidade das medidas de mitigação à intrusão marinha (recarga artificial de sistemas aquíferos com água residual tratada) presentemente em aplicação na Tunísia.

O presente artigo insere-se no âmbito da Cooperação Internacional em Águas Subterrâneas, CIAS (LNEC – Universidade Agostinho Neto, Luanda) e do Projecto de Cooperação Portugal – Tunísia (LNEC – I.N.R.G.R.E.F., Institut National de Recherches en Genie Rural, Eaux et Forets).

Palavras-Chave: Águas subterrâneas, intrusão marinha, modelação matemática, recarga artificial.

## 1 INTRODUÇÃO

A intrusão marinha em aquíferos costeiros é um dos fenómenos que pode influenciar a qualidade da água subterrânea nas áreas afectadas pela subida do nível médio do mar. A sobreexploração destes aquíferos, bem como a ausência de medidas de gestão adequadas encontram-se entre as principais causas deste fenómeno, já que a extracção não planeada de grandes volumes de água pode resultar na diminuição do nível de água subterrânea. Como consequência, a interface água doce / água salgada avança em direcção ao interior do continente, dando origem à salinização não só da água como também do solo.

A correcta gestão dos aquíferos costeiros requer assim a definição de um planeamento adequado e sustentável da captação da água subterrânea, que permita controlar ou remediar o avanço da cunha salina. As estratégias a adoptar devem ser baseadas numa correcta previsão da distribuição espacial da intrusão marinha nestes aquíferos, através da simulação dos processos físicos utilizando modelos matemáticos devidamente validados e calibrados. Os modelos podem ser utilizados não só na definição de estratégias de planeamento e gestão, bem como na previsão da resposta do aquífero às medidas aplicadas.

Nesta comunicação apresentam-se os resultados da modelação matemática da intrusão salina em aquíferos localizados em dois países africanos: Angola (aquífero Quelo-Luanda) e Tunísia (aquífero da Costa Oriental da península de Cap Bon). No primeiro caso, a simulação teve por objectivo simular diferentes cenários de subida do nível médio do mar, para posterior incorporação no parâmetro L do método GALDIT, que melhor reflecte diferentes cenários de subida do nível médio do mar. Este método, desenvolvido por Chachadi e Lobo Ferreira (2001) tem por objectivo avaliar a vulnerabilidade à intrusão marinha das regiões costeiras. A sua aplicação ao aquífero Quelo-Luanda encontra-se descrita em Terceiro *et al.* (2009). Quanto ao aquífero de Cap Bon, o processo de modelação teve por objectivo a análise quantitativa da aplicação de recarga artificial de sistemas aquíferos. Esta técnica já se encontra em fase de implementação na região desde Dezembro de 2007, com recurso a água residual tratada.

Na modelação dos aquíferos em estudo utilizou-se a interface GMS (Groundwater Modeling System) para correr o modelo FEMWATER, modelo tridimensional de elementos finitos, que permite simular o escoamento e transporte de massa nas zonas saturada e não saturada, incluindo os casos de regimes dependentes da densidade.

## 2 CARACTERIZAÇÃO DOS CASOS DE ESTUDO

### 2.1 Aquífero Quelo-Luanda

A República de Angola situa-se na costa ocidental de África, a sul do Equador, entre os paralelos 4º 22' e 18º 02'Sul. Tem uma área de 1 246 700 km<sup>2</sup> e 1 650 km de linha de costa banhada pelo oceano Atlântico. A sua fronteira terrestre tem um comprimento de 4 837 km, limitada a Norte pela República Democrática do Congo e o Congo (Brazaville), a Este pela Zâmbia e a Sul pela Namíbia. A nível administrativo, Angola divide-se em 18 províncias, sendo Luanda a capital do país.

O território angolano pode-se dividir em três zonas: a orla costeira, o planalto central e as terras altas. As zonas costeiras são geralmente baixas e arenosas a Sul, e bastante agrestes a Norte. A estreita planície litoral eleva-se bruscamente em direcção ao interior, configurando o planalto, que ocupa 65% do território com cotas compreendidas entre os 1 000 e 1 600 m, enquanto que as terras altas se situam a mais de 2 000 m de altitude. Os principais rios nascem no planalto central, e partem em três direcções: Atlântico

(situado a Oeste), Sul-Sudeste e Norte. Das 77 bacias hidrográficas angolanas as principais correspondem aos rios Congo (Zaire), Kwanza, Cunene, Cubango, Queve e Zambeze (Miguel, 2006).

Angola apresenta clima tropical. A região costeira é relativamente húmida, com uma precipitação média anual acima dos 600 mm, que diminui em direcção ao Sul. A temperatura média anual situa-se próximo dos 26° C (Miguel, 2006).

O aquífero Quelo-Luanda localiza-se na província de Luanda e numa parte da província de Bengo, apresentando uma extensão de cerca de 2 060 km<sup>2</sup>. A Figura 1 mostra a localização do aquífero em estudo.



Figura 1 – Localização da área de estudo Quelo-Luanda (Fonte: Miguel, 2006)

A população estimada para a área Quelo-Luanda é de aproximadamente 4,2 milhões de habitantes em 2005, o que corresponde aproximadamente 27% da população angolana (Miguel, 2006).

De modo simplificado pode-se considerar que a estratigrafia em torno de Luanda se define por quatro formações principais: Quelo, Luanda, Cacucaco e Quifangondo, dispostas de forma sub-horizontal. A formação Quelo sobrepõe-se às restantes, que só afloram em alguns sectores, cf. a Figura 2.

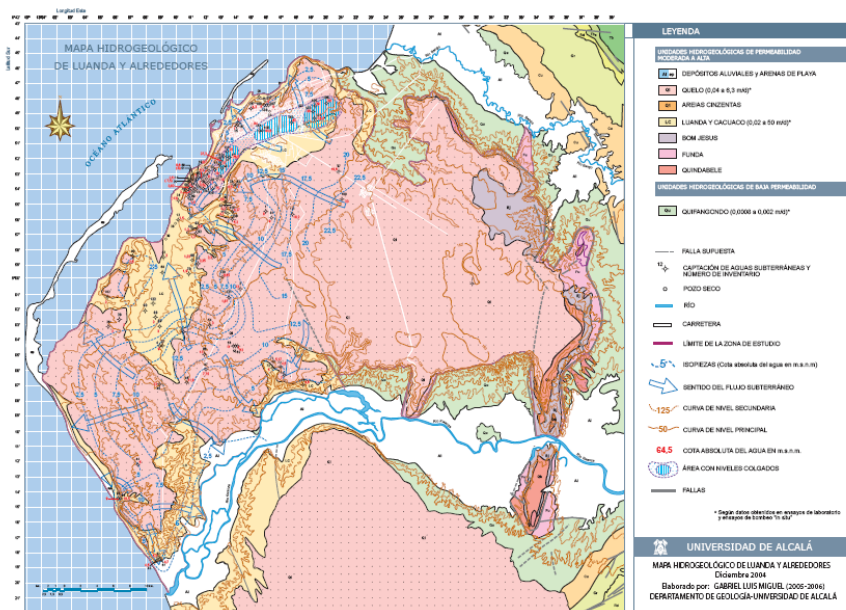


Figura 2 – Mapa hidrogeológico de Luanda e arredores (Fonte: Miguel, 2006)

As formações Quelo e Luanda são de carácter marcadamente detrítico. Embora recorrentemente apresentem argilas, sobretudo na formação Luanda, são os sedimentos arenosos os que melhor caracterizam a natureza desta região. A formação Cacuaco é composta por calcarenitos bioclásticos, constituindo corpos maciços, embora também se encontrem presentes níveis descontínuos de calcários pouco cimentados. A formação Quifangondo, apesar da presença de alguns níveis calcários, constitui-se como uma unidade de carácter argiloso, exceptuando a sua parte superior, determinando que esta formação possa constituir um nível de base, com permeabilidade muito baixa. Assim, a água subterrânea mantém-se armazenada e em circulação no seio das formações superiores.

Os valores de permeabilidade obtidos em laboratório para as fácies mais representativas das formações Quelo e Luanda, nos trabalhos desenvolvidos por Miguel (2006), permitem interpretar que ambas as unidades se comportam de forma semelhante no que respeita ao movimento da água subterrânea. O autor, no seu estudo, refere que o aquífero Quelo-Luanda apresenta um comportamento geral multicamada, com um carácter essencialmente livre, embora também se manifeste como semiconfinado (ou eventualmente confinado). O nível piezométrico regional do sistema encontra-se em geral a profundidades consideráveis (60 a 100 m), não obstante se encontrarem alguns níveis suspensos existentes à escala local.

As espessuras do sistema variam desde valores inferiores a 100 m, para as formações Quelo-Luanda e Cacuaco em torno de Luanda, e superiores a 500 m no sector meridional da região.

As águas subterrâneas têm um contacto prolongado com as rochas e materiais por onde circulam. Este facto contribui de forma decisiva para a definição da composição química destas águas, cujas características mineralógicas são adquiridas pelo contacto com os materiais que constituem o meio por onde circulam.

A Figura 3 mostra o mapa de isocondutividades e fácies hidrogeoquímicas do aquífero Quelo-Luanda e, em pormenor, a área modelada (descrita com maior detalhe na Secção 3.2.2). Como se pode verificar pela Figura 3, os valores de condutividade eléctrica variam desde cerca de 2 400  $\mu\text{S}/\text{cm}$  até aos 17 150  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , apontando para a possível salinização da água subterrânea nesta área. Verifica-se igualmente que é na faixa litoral que os valores de condutividade eléctrica se apresentam mais elevados, diminuindo à medida que aumenta a distância à linha de costa.

A mesma Figura 3 contém diferentes representações do diagrama de Stiff. Destaca-se aqui a representatividade das águas cloretadas sódicas neste sector, indiciando a mistura de água doce com água salgada. Miguel (2006) aponta as bombagens excessivas, assim como as profundidades inadequadas das captações próximas da costa, como possíveis causas da intrusão marinha. A fácies sulfatada cálcica, embora também presente, é menos representativa nesta área. Pode, no entanto, representar um episódio intermédio da evolução geoquímica da água.

Estes dados provêm de campanhas realizadas nos anos 2002/03 e 2003/04.



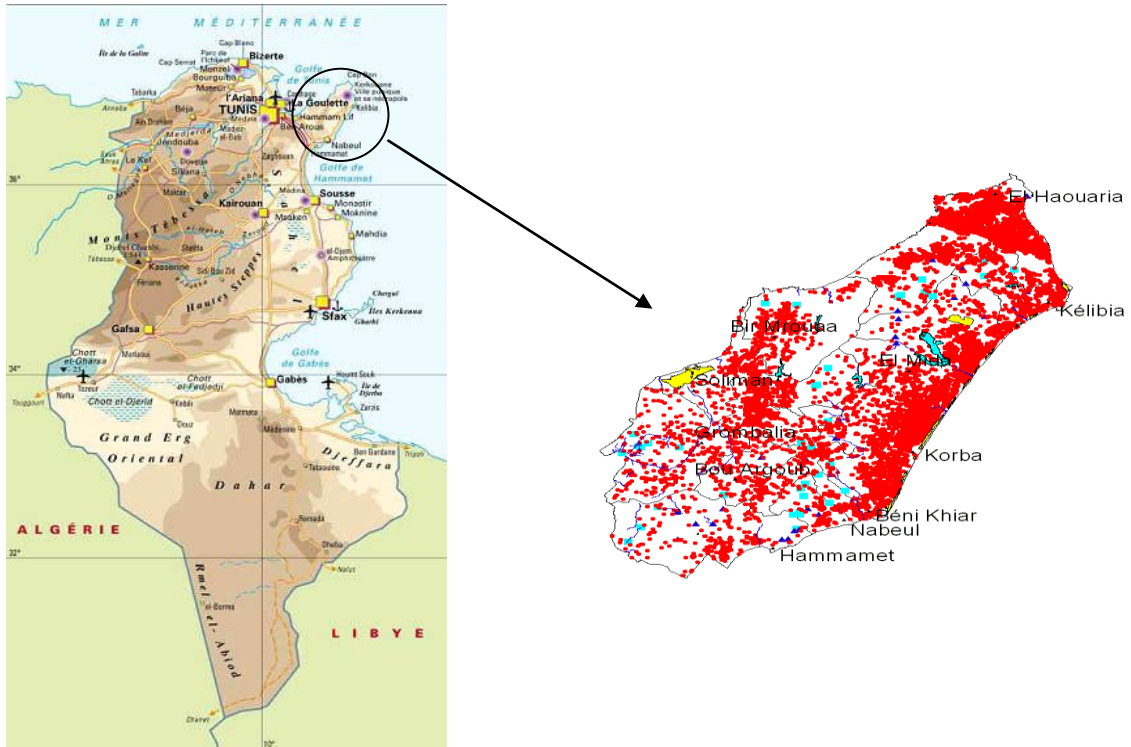


Figura 4 – Localização de Cap Bon na Tunísia e visualização dos furos existentes no caso em estudo

Desde os anos 50 que o número de furos para irrigação tem vindo a aumentar, resultando num rebaixamento significativo do nível piezométrico e na consequente deterioração da qualidade da água subterrânea devido à intrusão marinha. A Figura 4 apresenta os mais de 21 mil furos de captação de Cap Bon, tendo cerca de 3 mil furos sido já abandonados devido à sua incapacidade de exploração em termos de quantidade e qualidade (Gaaloul, 2009).

O sistema aquífero da Costa Oriental (cf. Figura 5, o sistema a cor de rosa “Cote Orientale”) apresenta uma área de 438 km<sup>2</sup>, é limitado a Noroeste pela cadeia montanhosa de Djbel Sidi Abed Errahmen, a Sudeste e Norte pelo Mar Mediterrâneo e a Sudoeste pelo sistema aquífero de Hammamet-Nabeul. É essencialmente constituído por calcários, margas e aluviões nas zonas junto aos rios (cf. Figura 5).

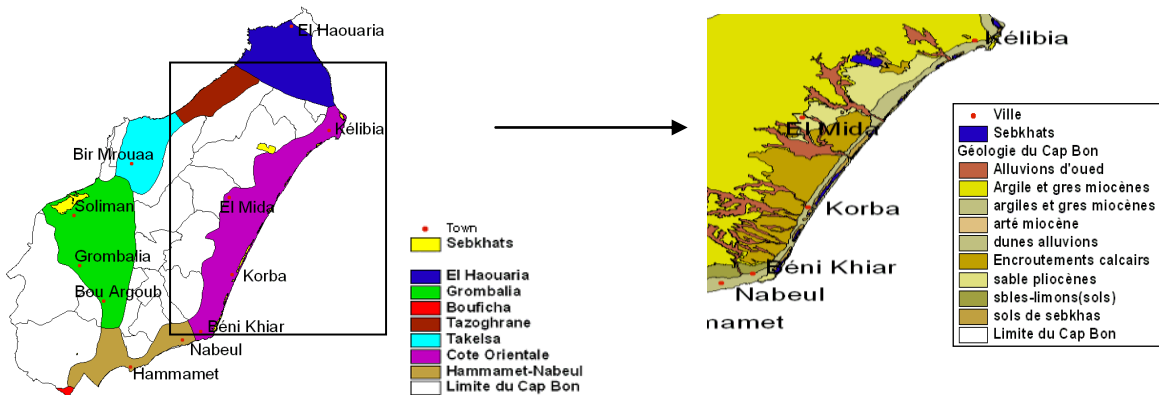


Figura 5 – Sistemas aquíferos do Cap Bon (Tunísia) e material geológico do sistema aquífero da Costa Oriental

Devido ao problema de intrusão marinha por sobreexploração de água subterrânea, vários cenários de mitigação estão a ser considerados e postos em prática na região. Uma das soluções consideradas é a aplicação de recarga artificial com água residual tratada. Esta solução começou a ser implementada em 22 de Dezembro de 2007 em três bacias de recarga a funcionar alternadamente e que recarregam o sistema aquífero com 1 500 m<sup>3</sup> diários (segundo fontes recolhidas no local), utilizando água residual com tratamento secundário proveniente da ETAR de “Step of Korba”. O remanescente da produção da ETAR é descarregado directamente para o curso de água adjacente.

Na Figura 6 apresenta-se a vista geral de uma das três bacias da estação de recarga artificial de Korba localizada no sistema aquífero da Costa Oriental (Cap Bon – Tunísia) com um caudal de alimentação de 1 500 m<sup>3</sup>/dia.



Figura 6 – Vista geral de uma das três bacias da estação de recarga artificial de Korba localizada no sistema aquífero da Costa Oriental (Cap Bon – Tunísia) com um caudal de alimentação de 1500 m<sup>3</sup>/dia

### 3 METODOLOGIAS APLICADAS AOS CASOS DE ESTUDO

#### 3.1 Considerações gerais

O FEMWATER é um modelo tridimensional de elementos finitos, que permite simular o escoamento e o transporte de massa nas zonas saturada e não saturada, incluindo os casos de regimes dependentes da densidade (Lin *et al.*, 1997).

Em Novo *et al.* (2003) são apresentadas várias vantagens do modelo. Destaca-se aqui o facto do FEMWATER não necessitar de um grande volume de informação relativa aos parâmetros do fluido e material para executar uma simulação. O programa possui também um módulo que permite analisar se os dados de entrada estão correctos, reportando eventuais erros a este nível, já que a definição tanto de opções como de parâmetros incompatíveis ou inconsistentes pode conduzir o modelo a gerar um resultado incorrecto. Uma vez que o FEMWATER simula o escoamento na zona não saturada, o aquífero é modelado na totalidade e as fontes, sumidouros e condições de fronteira podem ser directamente representados na malha. Como principal desvantagem do modelo os autores apontam a sua elevada utilização de memória RAM.

O FEMWATER tem vindo a ser utilizado por vários autores nos seus trabalhos, com diversos objectivos. Gau *et al.* (2006) estimaram o tempo de chegada da água infiltrada numa bacia de recarga artificial até ao nível piezométrico para várias condições hidrogeológicas. Ting *et al.* (2005), no estudo da recarga de aquíferos através de irrigação, adoptaram o modelo com o objectivo de simplificar as complexas

condições de percolação desde um campo de arroz (planície de Pingtung, Taiwan) até à massa de água subterrânea. O modelo permitiu também analisar o fluxo lateral entre as fronteiras secas e alagadas no campo de arroz, bem como avaliar a recarga eficaz. Datta *et al.* (2009) utilizaram o FEMWATER para avaliar a eficácia de diferentes estratégias de captação de água no controlo do processo de intrusão marinha num aquífero costeiro localizado em Andhra Pradesh, Índia.

### 3.2 Aquífero Quelo-Luanda

#### 3.2.1 Enquadramento

Com vista à realização de uma análise mais precisa sobre o estado da intrusão marinha da área de estudo, encontra-se em desenvolvimento um modelo matemático com utilização do programa FEMWATER (interface GMS v6.5). Apresenta-se nesta comunicação a simulação efectuada para a situação de referência.

O processo de modelação foi realizado para o regime estacionário. O objectivo do trabalho de modelação é, como referido anteriormente, simular diferentes cenários de subida do nível médio do mar, para posterior incorporação no parâmetro L do método GALDIT.

#### 3.2.2 Modelo conceptual

Na elaboração do modelo conceptual é necessário considerar os limites a modelar, os parâmetros hidráulicos do material geológico, o fluxo de entrada e o fluxo de saída da região. O modelo conceptual foi obtido recorrendo não só à informação em SIG, como também a outra informação disponível para a área de estudo.

O modelo foi aplicado à zona da Costa do Sol, localizada na faixa costeira, onde foi observada a existência de água salgada em poços aí situados. A área de estudo, com de cerca de 40 km<sup>2</sup>, foi delimitada considerando a superfície topográfica e o sentido de fluxo subterrâneo, *cf.* o mapa hidrogeológico apresentado na Figura 2. O limite Sudoeste foi definido por um rio existente na região. A Figura 7 apresenta a localização da área de estudo em pormenor, assim como os poços onde foram efectuadas medições de níveis piezométricos. O perfil hidrogeológico da zona da Costa do Sol apresenta camadas intercaladas de areias e argilas.



Figura 7 – Localização em pormenor da área de estudo

Relativamente à espessura do sistema aquífero, optou-se por considerar a profundidade dos poços localizados na área como base. No que concerne aos parâmetros hidráulicos considerou-se para o modelo



uma condutividade hidráulica de 2,0 m/d. Este valor foi obtido por Miguel (2006) em ensaios de bombagem realizados num poço localizado na área de estudo, tendo-se adoptado esse valor para a totalidade da zona em análise. A recarga utilizada no modelo foi de 50 mm por ano. Este valor foi obtido considerando o valor excepcional de 250 mm/ano que, de acordo com Miguel (2006), deve ocorrer a cada 5 ou 10 anos no aquífero de Quelo-Luanda. Por último, os valores de extracção considerados no modelo foram os medidos por Miguel (2006), nos poços localizados na Figura 7. O valor total da extracção na área aproxima-se dos 2000 m<sup>3</sup>/d, embora não se disponha de informação sobre o volume extraído em todos os poços.

### 3.2.3 Análise dos resultados

Tendo em conta o exposto na secção anterior, procedeu-se à corrida do modelo em regime estacionário. A Figura 8 apresenta o resultado obtido para esta corrida, realizada com o programa FEMWATER (interface GMS v6.5). Da análise da referida Figura é possível constatar o rebaixamento freático junto ao litoral, revelando o problema da intrusão marinha verificado na zona. Os valores obtidos pela corrida do modelo são aproximadamente semelhantes aos valores medidos por Miguel (2006) por piezómetros na região na zona Norte da área simulada. Contudo, o modelo necessita de calibração e validação, por incorporação de informação actualizada, nomeadamente no que respeita aos volumes extraídos, de forma a dar resposta adequada ao fenómeno de intrusão marinha verificado na região.

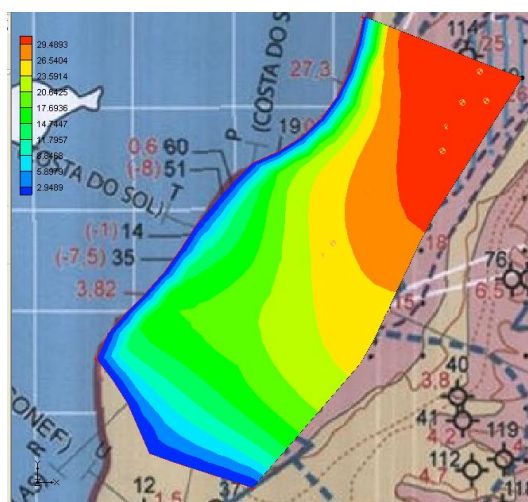


Figura 8 – Resultados da corrida em regime estacionário (a amarelo os furos de captação)

## 3.3 Aquífero da Costa Oriental da península de Cap Bon

### 3.3.1 Enquadramento

O objectivo do processo de modelação com o programa FEMWATER no caso de estudo tunisino foi analisar o comportamento do nível piezométrico do aquífero da Costa Oriental de Cap Bon a vários cenários de recarga artificial.

Inicialmente desenvolveu-se uma corrida do modelo em regime estacionário sem aplicação de recarga artificial. De seguida aplicaram-se diferentes cenários de recarga artificial no local da estação que actualmente se encontra em funcionamento (Estação de Korba).

O desenvolvimento do modelo conceptual para o caso de estudo assim como os resultados obtidos para a metodologia acima referida irão ser apresentados na presente secção.

### 3.3.2 Modelo conceptual

Os limites definidos para o modelo foram os seguintes: i) A Nordeste, o limite do sistema aquífero da Costa Oriental ii) a Sudoeste, o mar Mediterrâneo e iii) os restantes dois limites foram definidos pelos rios presentes na região. A Figura 9 representa os limites considerados para o modelo, tendo uma área de 57,3 km<sup>2</sup>. Em relação à espessura do sistema aquífero verifica-se pela localização dos ralos, e por informação disponibilizada no local, uma espessura aproveitável de cerca de 20 metros.

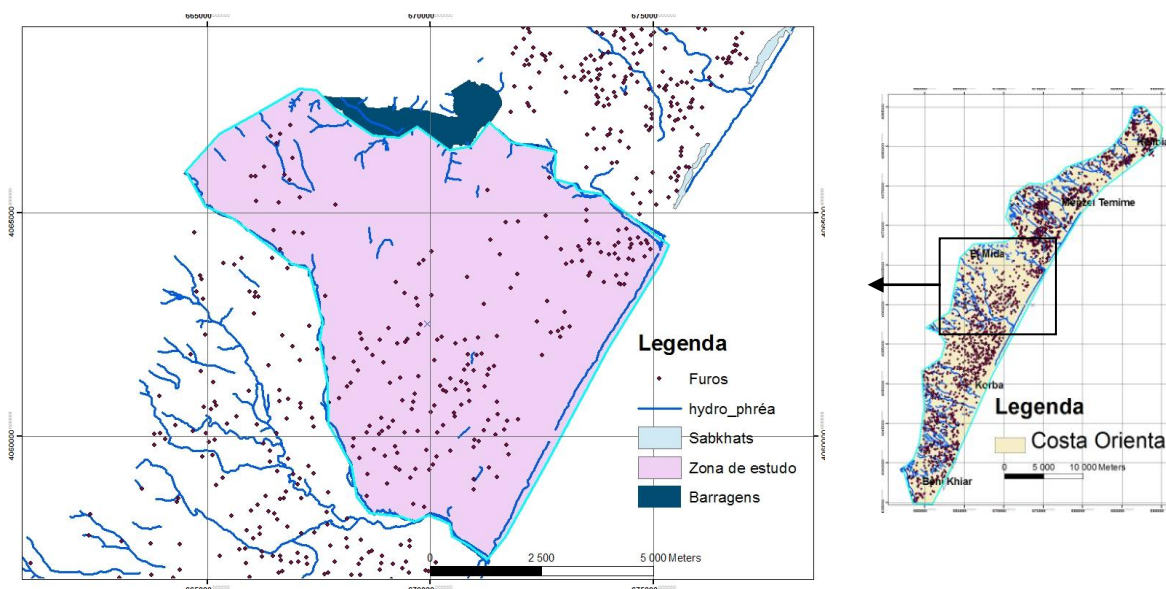


Figura 9 – Visualização e localização do caso em estudo (visualização dos furos existentes)

Para os parâmetros hidráulicos considerou-se que a região apresenta como materiais geológicos calcários e margas. Com a informação disponibilizada foi considerada, no modelo, uma condutividade hidráulica de 3,0 m/dia.

A recarga usada no modelo foi de 56 mm por ano, valor este que foi calculado como valor médio de recarga para o sistema aquífero da Costa Oriental pelo I.N.R.G.R.E.F.

Em relação à extracção de água verificou-se a necessidade de simplificar a análise. A Figura 9 apresenta a localização dos vários furos de extracção que foram contabilizados numa base de dados da Tunísia. O volume de extracção debitado pelos inúmeros furos representados ultrapassa os 10000 m<sup>3</sup>/dia. Para o modelo, de forma a simplificar e permitir a sua corrida, apenas se consideraram os furos com extracção superior a 75 m<sup>3</sup>/dia e pontualmente cinco locais em que o aglomerado de furos era superior a 150 m<sup>3</sup>/dia. Desta forma, considerou-se que a extracção total é de 6200 m<sup>3</sup>/dia, havendo uma maior densidade de furos no litoral e junto aos rios.

### 3.3.3 Resultados da em regime estacionário sem recarga artificial

Procedeu-se à corrida do modelo em regime estacionário com os valores acima apresentados. A Figura 10 representa o resultado final da corrida em regime estacionário com o programa FEMWATER (interface GMS v6.5).

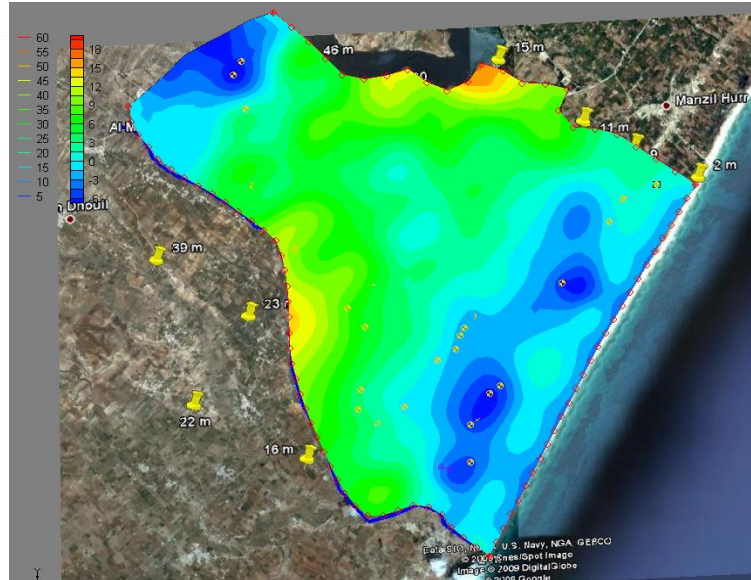


Figura 10 – Resultados da corrida em regime estacionário (A amarelo os furos de captação e como imagem de fundo uma imagem retirada do Google Earth)

Como é possível analisar na Figura 10, existem no litoral três zonas em que o rebaixamento freático é de tal modo significativo (inferior a -7 metros) que o problema de intrusão marinha é real. Os valores obtidos pela corrida do modelo são aproximadamente semelhantes aos valores medidos em 2008 por piezómetros na região, como é possível verificar na Figura 11.

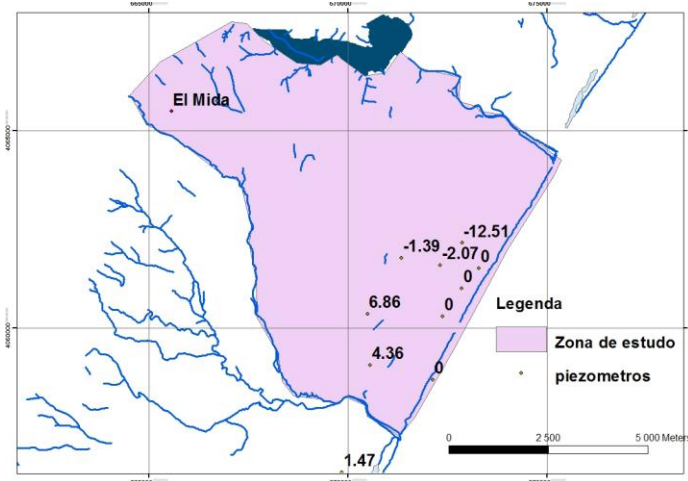


Figura 11 – Localização de piezómetros e nível piezométrico na área em estudo (dados de 2008)

De notar que a quantificação do balanço hidrológico para um ano médio deveria permitir a extracção sustentável no modelo. No entanto, a densidade de furos é de tal forma concentrada no litoral que provoca um enorme rebaixamento de nível.

### 3.3.4 Análise de alternativas para a resolução global do problema

Após a identificação das várias características da área em estudo, o passo seguinte da modelação passou pela consideração da entrada adicional de água residual na estação de Korba. Consideraram-se três cenários: i) entrada de 1 500 m<sup>3</sup>/dia (situação actual), ii) de 3 000 m<sup>3</sup>/dia e iii) de 6 000 m<sup>3</sup>/dia. As Figuras 7 e 8 apresentam os resultados das corridas do modelo matemático com taxas de recarga artificial de, respectivamente, 1 500 e 3 000 m<sup>3</sup>/dia. Na Figura 12 e Figura 13 destacou-se a localização da bacia de recarga artificial.

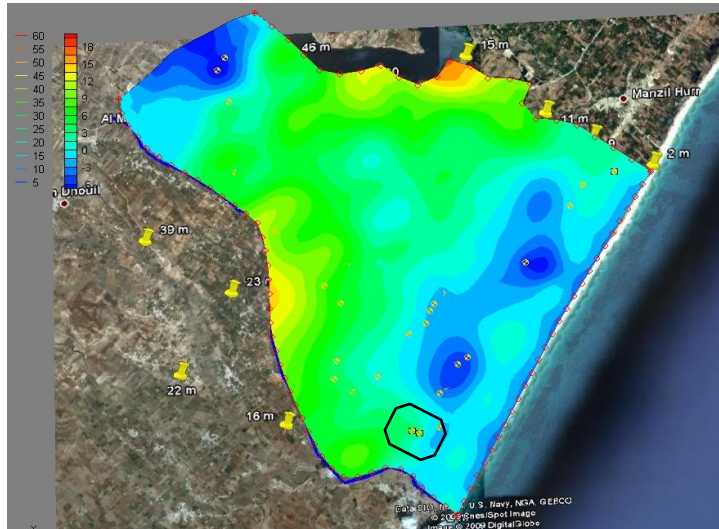


Figura 12 – Resultados da modelação com uma taxa de recarga artificial de 1 500 m<sup>3</sup>/dia (situação actual)

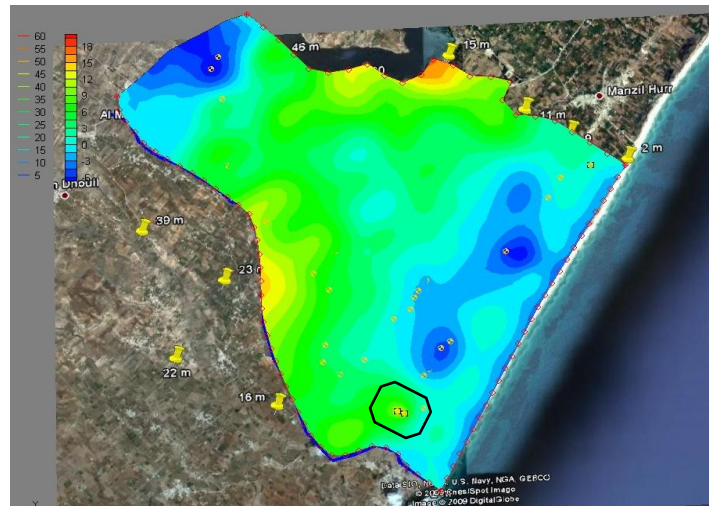


Figura 13 – Resultados da modelação com uma taxa de recarga artificial de 3 000 m<sup>3</sup>/dia

Foram realizadas corridas adicionais considerando dois novos locais de recarga artificial, visando seleccionar a sua localização e o volume de injeção necessário para resolver o problema da intrusão salina a médio prazo. A Figura 14 mostra o resultado final da aplicação da recarga artificial nos dois locais seleccionados, permitindo concluir a existência de uma solução tecnicamente viável.

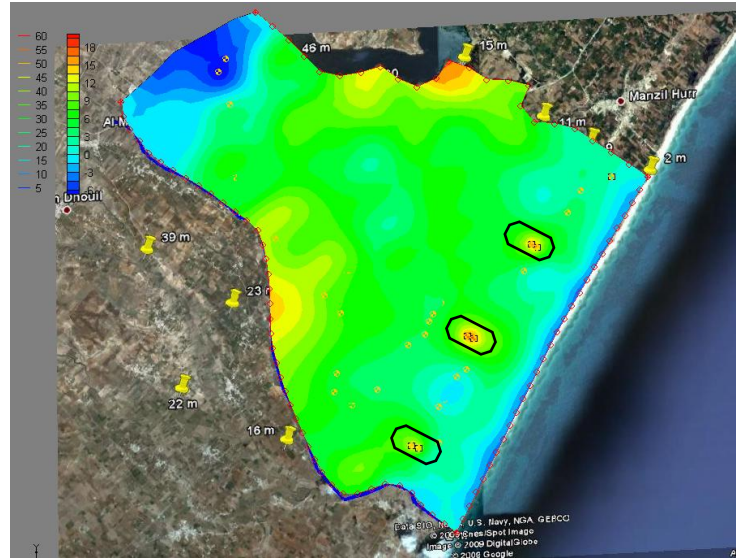


Figura 14 – Resultado da modelação da recarga artificial com três estações e taxas de recarga 3 x 3000 m³/dia

#### 4 CONCLUSÕES

Os mapas apresentados nesta comunicação constituem instrumentos fundamentais de apoio à gestão sustentável destes aquíferos costeiros, no que concerne à utilização e protecção dos recursos hídricos subterrâneos.

No que respeita ao aquífero Quelo-Luanda é de todo o interesse reforçar a análise efectuada com dados hidrogeológicos adicionais para a modelação matemática, robustecendo o processo de gestão.

Em relação aos resultados obtidos para o caso tunisino é possível tirar as seguintes conclusões:

- A recarga artificial actual (1500 m³/dia), apesar de diminuir o problema do rebaixamento do nível piezométrico não o resolve totalmente, visto que perto da estação de recarga existem zonas em que o nível é inferior a 0 metros.
- A recarga artificial com 3000 m³/dia, ou seja, o dobro da actual, permite a resolução total do problema na zona junto à estação de recarga artificial, visto que junto àquela zona todo o nível piezométrico fica superior a 0 metros.
- Em relação à recarga artificial com 6000 m³/dia verifica-se que o valor é demasiado elevado. Não serão necessários valores tão elevados para a resolução do problema na zona contígua à estação de Korba.

A modelação apresentada no presente artigo foi utilizada por Lobo Ferreira *et al.* (2009) como apoio, em conjunto com o índice GABA-IFI (Lobo Ferreira *et al.*, 2007), à identificação dos melhores locais para a aplicação de recarga artificial para a resolução total do problema do rebaixamento piezométrico da região de Korba em Cap Bon.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Ministério de Ciência e Tecnologia, Fundo Sectorial de Recursos Hídricos – CTHIDRO, do Brasil, à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) e ao LNEC, de Portugal, e à Universidade Agostinho Neto de Luanda, Angola, pelo co-financiamento da Cooperação Internacional em

Águas Subterrâneas (CIAS), no âmbito da qual se desenvolveu, no LNEC, o trabalho que se apresenta nesta comunicação.

Agradece-se à Fundação para a Ciência e Tecnologia de Portugal (FCT) e ao *Ministry of Higher Education, Scientific Research and Technology* da República da Tunísia, o financiamento do Projecto de Cooperação Portugal – Tunísia, intitulado “*Integrated Water Resources Management in Coastal aquifers*”, que decorre de 2007 a 2009 no LNEC (Portugal) e no I.N.R.G.R.E.F., *Institut National de Recherches en Genie Rural, Eaux et Forets*, da Tunísia.

Agradece-se ao I.N.R.G.R.E.F. a cedência de Informação hidrogeológica da República da Tunísia, em formato digital e em Sistema de Informação Geográfica.

## BIBLIOGRAFIA

CHACHADI, A.G; LOBO FERREIRA, J.P. (2001). *Sea water intrusion vulnerability mapping of aquifers using the GALDIT method*. COASTIN – a coastal policy research newsletter, n.º4, pp. 7-9.

GAALOUL, N. (2009) - *A Modeling study of Seawater Intrusion in the Cap Bon Plain Case Study: Grombalia aquifer And Oriental Coastal aquifer (Cap Bon in the North of Tunisia)*. Apresentação no âmbito do Projecto de Cooperação Portugal-Tunisia, Lisboa (Portugal), Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

DATTA, B., VENNALAKANTI, H., DHAR, A. (2009). *Modeling and control of saltwater intrusion in a coastal aquifer of Andhra Pradesh, India*. Journal of Hydro-environment Research, 3: 148-159.

GAU, H.S., HSIEH, C.Y., LIU, C.W. (2006). *Application of grey correlation method to evaluate potential groundwater recharge sites*. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 20: 407–421.

LIN, H.C., RICHARDS, D.R., YEH, G.T., CHENG, J.R., CHENG, H.P., JONES, N.L. (1997). *FEMWATER: a three-dimensional finite element computer model for simulating density-dependent flow and transport in variably saturated media*, Technical Report CHL-97-12, U.S. Army Corps of Engineer, 151pp.

LOBO FERREIRA, J.P., DIAMANTINO, C., OLIVEIRA, M.M. (2007). *Gabardine - Second Interim Activity Report - LNEC Activity. Junho*. Lisboa (Portugal), Laboratório Nacional de Engenharia Civil. 32 pp.

LOBO FERREIRA, J.P., OLIVEIRA, L. G. S., ROCHA, E. J. T., GAALOUL, N. (2009). *Índice De Suporte À Escolha De Áreas Favoráveis À Recarga Artificial (Gaba - Ifi): Análise Das Componentes Ambientais, Sociais E Económicas* Comunicação apresentada no 9º SILUSBA (Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa), Benguela, 28-30 de Outubro. 14 pp.

MIGUEL, G.L. (2006). *Caracterización hidrogeológica y ambiental de Luanda y su alrededores (Angola)*. Departamento de Geologia da Universidade de Alcalá.

NOVO, M.E., IKAVALKO, V., DIAMANTINO, C., LOBO FERREIRA, J.P. (2003). *MANPORIVERS. Management policies for priority water pollutants and their effects on foods and human health: generic characterization of mathematical models to simulate the pollutant transport in groundwater*. Relatório 310/03 – NAS, LNEC, Lisboa, 113 pp.

OLIVEIRA, L. G. S., OLIVEIRA, M.M., LOBO FERREIRA, J.P. (2008). *Índice de suporte à escolha de áreas favoráveis à recarga artificial (GABA-IFI) e aplicação à zona oeste do sistema aquífero de Querença-Silves*. 9º Congresso da Água, Estoril (Portugal), 2 a 4 Abril.

TERCEIRO, A., LOBO FERREIRA, J.P., MIGUEL, G., ADÃO, A. (2009). *Avaliação da vulnerabilidade à intrusão marinha do aquífero costeiro Luanda-Quelo usando o método GALDIT*. Comunicação apresentada no 9º SILUSBA (Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa), Benguela, 28-30 de Outubro, 14 pp.

TING, C., TSOU, I., LU, J. (2005). *A study on the estimation of groundwater recharge by agriculture irrigation*. Irrigation and Drainage, 54: 339–351.

