

# LIMITAÇÕES DO MODELO DRASTIC

## APLICAÇÃO A DUAS REGIÕES ALGARVIAS CONTAMINADAS POR NITRATOS

T.Y. Stigter<sup>1</sup> & A.M.M. Carvalho Dill<sup>2</sup>

**Resumo** - A poluição de aquíferos, nomeadamente por práticas agrícolas, tem despertado a atenção de todos aqueles que se dedicam ao estudo das águas subterrâneas, que se preocupam com a sua qualidade e com o implementar de uma política de gestão da água, coerente e integrada. Numerosos têm sido os modelos desenvolvidos com o fim de avaliar a vulnerabilidade duma região à contaminação das águas subterrâneas. No entanto a aplicação desses modelos tem-se demonstrado muito complexa, conduzindo muitas vezes a conclusões que nada têm a ver com a realidade. Tal facto deve-se às simplificações que se utilizam, à dificuldade de se obterem os parâmetros que entram na definição dos índices e ao desconhecimento dos processos que realmente intervêm na contaminação das águas. Foi testada a validade do modelo DRASTIC em 2 regiões algarvias sujeitas a práticas agrícolas intensivas: a Campina da Luz e a Campina de Faro. Na Campina de Faro, as águas subterrâneas apresentam concentrações de nitratos muito elevados que chegam a ultrapassar os 500 mg/l, enquanto que na Campina da Luz raramente se encontram valores superiores a 100 mg/l. Curiosamente o método DRASTIC atribui um índice de vulnerabilidade superior à Campina da Luz. As causas desta *incongruência* são discutidas.

**Palavras-chave** - nitrato, vulnerabilidade, DRASTIC.

---

<sup>1</sup> Estudante de doutoramento no CVRM, polo do CVRM/Universidade do Algarve, U.C.T.R.A., Campus de Gambelas, 8000 Faro, Portugal, tstigter@ualg.pt. tel +351 289 800900 fax +351 289 818353

<sup>2</sup> Investigadora do CVRM, Instituto Superior Técnico, Centro de Valorização de Recursos Minerais, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal, adill@mail.telepac.pt. Professora Auxiliar na Universidade do Algarve, U.C.T.R.A., Campus de Gambelas, 8000 Faro Portugal. tel +351 289 800900 fax +351 289 818353

## INTRODUÇÃO

A poluição resultante do uso de fertilizantes, associados às práticas agrícolas, nas águas subterrâneas é sobejamente conhecida. A utilização de fertilizantes azotados é prática mundial e como consequência a concentração de nitratos nas águas subterrâneas tem vindo a aumentar, pondo em risco a saúde das populações. O grau de contaminação de determinada região depende de inúmeros factores, tais como as características hidrogeológicas, as características do solo, o tipo de contaminante, a quantidade utilizada e os métodos de aplicação. Por outras palavras, estimar a *vulnerabilidade* de uma região à contaminação das águas subterrâneas não é tarefa fácil, sendo no entanto imprescindível de se fazer.

Já de si o termo *vulnerabilidade* é ambíguo. Vrba e Zoporozec (1994) definem a *vulnerabilidade* de um sistema hidrogeológico como sendo «uma propriedade intrínseca do sistema e dependente da sensibilidade desse mesmo sistema aos impactos humanos e/ou naturais». Os mesmos autores distinguem também a *vulnerabilidade intrínseca (ou natural)* da *vulnerabilidade específica (ou integrada)*. A primeira é função dos factores hidrogeológicos (características dos aquíferos, do solo e dos materiais geológicos). A segunda é definida pelos impactos potenciais do uso específico dos solos e dos contaminantes associados a esse uso. Lobo-Ferreira e Cabral (1991) definem *vulnerabilidade* como «a sensibilidade da qualidade das águas subterrâneas a uma carga poluente, função apenas das características intrínsecas do aquífero».

Os índices de vulnerabilidade foram criados com o fim de identificar rapidamente o potencial de poluição de uma região. De entre os índices conhecidos, refere-se o DRASTIC definido por Aller *et al.* (1987), que calcula o índice com base em 7 parâmetros hidrogeológicos cujas iniciais formam a sigla. Contudo a aplicação de índices de vulnerabilidade tem revelado limitações:

1. Os parâmetros hidrogeológicos são difíceis de estimar (não existem dados, a região é heterogénea, etc.)
2. Mesmo quando os valores são estatisticamente representativos e calculados através inúmeras medições no campo, é necessário ter muita atenção com a **forma** como esses parâmetros são introduzidos no cálculo dos índices de vulnerabilidade.

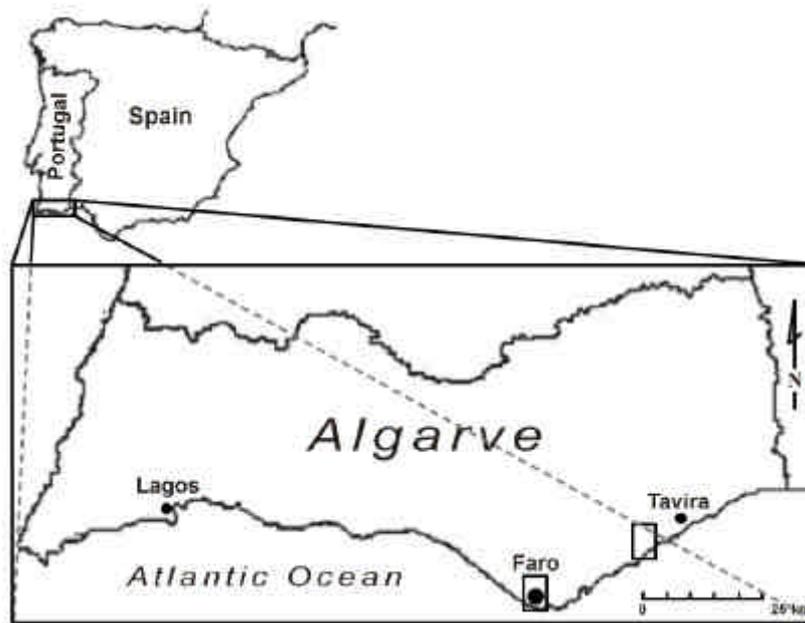
Este facto torna-se claro quando se tenta validar o modelo DRASTIC, em regiões bem caracterizadas e já contaminadas. Embora pareça absurdo falar em índices de vulnerabilidade em regiões já contaminadas, esta discussão pretende mostrar em que medida o uso de modelos de vulnerabilidade pode facilmente induzir a conclusões erradas, que nada têm a ver com a realidade.

Para o demonstrar foram seleccionadas duas regiões algarvias, sujeitas a práticas agrícolas intensivas – a Campina de Faro e a Campina da Luz. Os processos hidroquímicos envolvidos na contaminação dessas áreas foram identificados após 3 anos de estudo hidrogeológico detalhado.

Descrevem-se de seguida as características hidrogeológicas e hidroquímicas de ambas as regiões. Discutem-se os factores envolvidos no processo de contaminação das águas subterrâneas, evidenciando o papel decisivo que o sistema de irrigação tem no processo de contaminação ao promover a concentração das águas e a mistura de águas de várias profundidades (uso de noras e furos). Finalmente referem-se as limitações do método DRASTIC quando aplicado às regiões acima citadas.

## **ÁREAS DE ESTUDO**

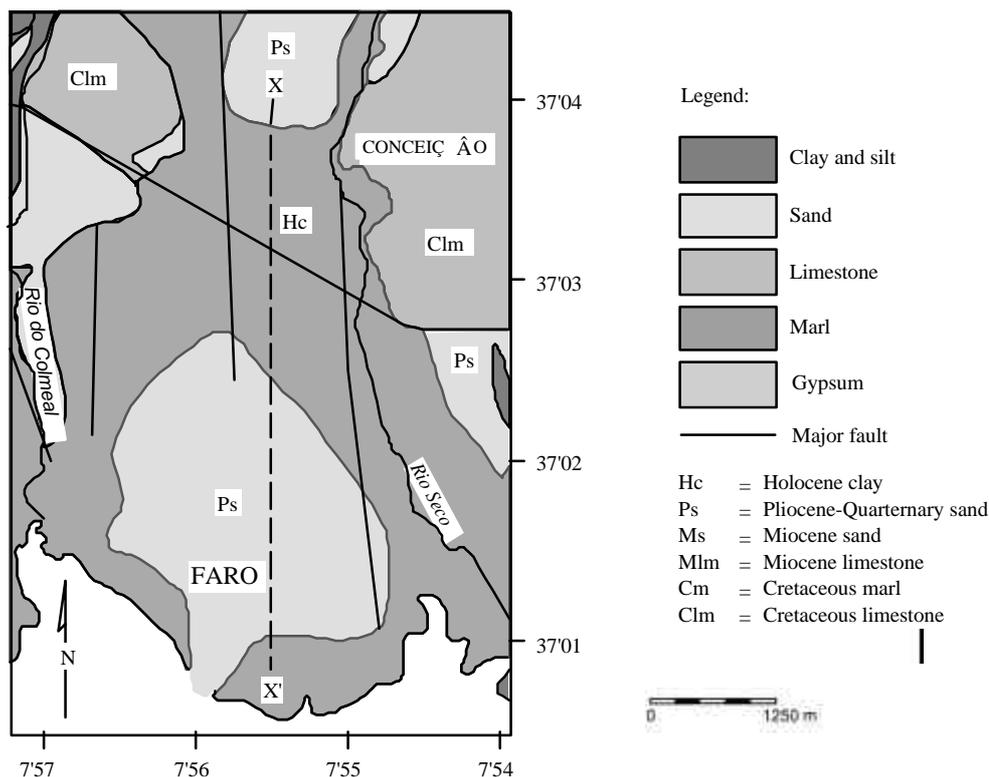
As Campinas de Faro e da Luz de Tavira localizam-se respectivamente a Norte e a 25 km a Este da capital algarvia (figura 1). Ambas as regiões apresentam clima com características mediterrânicas quentes, temperatura média anual de 16,3 °C e precipitação média anual variando entre os 500 e os 600 mm (Loureiro and Coutinho, 1995). A evapotranspiração potencial (ETP) excede consideravelmente a precipitação anual e ronda aproximadamente os 1700 mm (Schneider, 1981). A evapotranspiração real (ETR) perfaz 85 % da precipitação, e foi calculada pela razão de cloretos nas águas da chuva e nas águas subterrâneas (Stigter *et al*, 1998). Oliveira da Silva (1984) e Lourenço da Silva (1989) calcularam a ETR utilizando os métodos de Thornthwaite, Turc and Coutagne, tendo obtido valores que variaram entre 70.8 e 85.4 %.



**Fig. 1.** localização das áreas de estudo.

Grande parte da vegetação autóctone foi inicialmente substituída por amendoeiras, figueiras e oliveiras e por último por agricultura de regadio, incluindo citrinos e horticultura de ar livre e em estufa (nomeadamente na Campina de Faro). Hoje em dia, os citrinos são a cultura dominante em ambas as regiões.

A Figura 2 mostra o mapa geológico da Campina de Faro, elaborado por Stigter *et al* (1998). Os sedimentos mais antigos que afloram a NW são as margas e os calcários do Cretácico, que inclinam para Sul, localizando-se, já próximo de Faro, a 200 m de profundidade. Seguem-se calcários ricos em fósseis e as areias e margas do Miocénico, depositados numa estrutura tipo graben (Silva, 1989). Os sedimentos miocénicos inclinam ligeiramente para leste mas devido à presença de inúmeras falhas de direcção N-S, apresentam uma estrutura em «teclas de piano» (Silva *et al.*, 1986; Silva, 1989). O topo das camadas miocénicas situa-se entre os 3 e os 25 m de profundidade. A presença das margas parece ser bastante irregular (Silva, 1989). Areias e cascalheiras de idade Plio-Quaternária completam esta sucessão e afloram a NW e próximo de Faro. A espessura destes depósitos varia entre 8 e 50 m, mas devido à erosão marinha e fluvial que ocorreu no Holocénico, existem áreas onde esta espessura é bastante mais reduzida, tendo-se depositado posteriormente siltes e argilas de origem marinha, fluvial e aluvial, que podem atingir os 10 m de espessura.



**Fig. 2.** mapa geológico da Campina de Faro.

Distinguem-se na Campina de Faro 3 sistemas aquíferos. O primeiro sistema corresponde às camadas calcárias do Cretácico, e que se encontram separadas pelas margas. O segundo sistema aquífero é formado pelos calcários do Miocénico. A sua espessura aumenta de Norte para Sul (Silva, 1989). O terceiro Sistema aquífero é formado pelas areias do Miocénico, do Pliocénico e do Quaternário. Almeida e Silva (1987) referem a existência de uma camada confinante entre os dois aquíferos superiores. O aquífero arenoso é considerado freático, pois embora seja coberto pelas argilas e siltes do Holocénico, a espessura desses sedimentos de cobertura é reduzida, não lhe conferindo características de aquífero confinado.

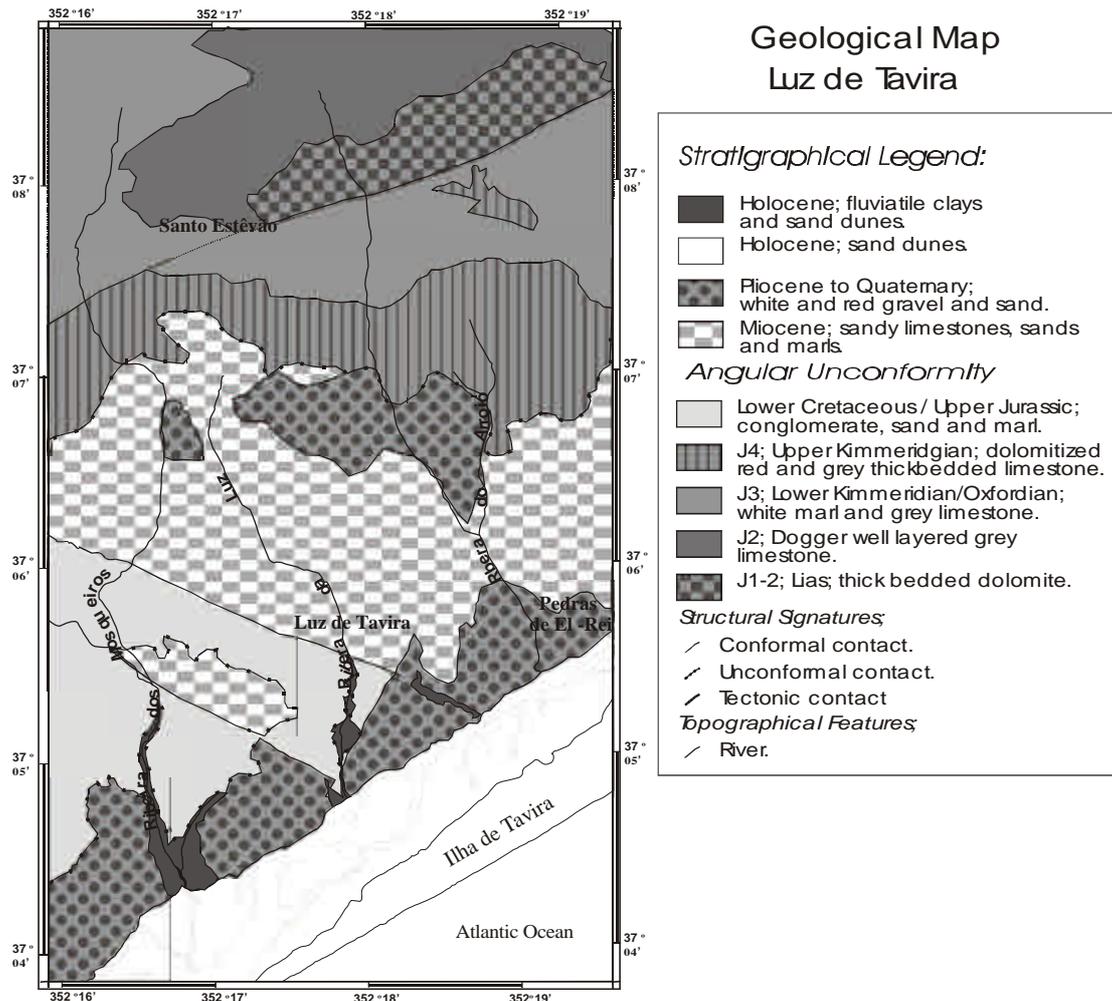
As falhas presentes na região têm papel importante na hidrogeologia. As falhas N-S parecem constituir locais de escoamento preferencial para as águas subterrâneas. As falhas de direcção NE-SW parecem servir de barreira. Indicações para este comportamento das falhas foram fornecidas quer pelo padrão de fluxo quer pela qualidade das águas subterrâneas (Stigter *et al*, 1998).

A Figura 3 mostra o mapa geológico da região da Campina da Luz adaptado de Bonte (1999). Os sedimentos mais antigos que afloram na região são de idade Jurássica e consistem na alternância de camadas de calcário, dolomitos e margas. A subdivisão

dos sedimentos jurássicos nesta área tem sido feita por vários autores (Silva, 1984; Manuppella *et al.*, 1987). De baixo para cima encontram-se:

1. a unidade J1-2 do Liásico, que ocorre a norte da região estudada, no núcleo do anticlinal de direcção E-W e que é constituída por camadas espessas de dolomitos cinzentos, finamente cristalinos e carsificados) que podem atingir os 300 m de espessura (Manuppella *et al.*, 1987);
2. a unidade J2, que circunda os sedimentos do Liásico no núcleo do anticlinal a Norte de Sto Estevão, aflorando a norte da unidade J1 e que é constituída por calcários cinzentos com espessura calculada em 200 m (Manuppella *et al.*, 1987);
3. a unidade J3 que aflora a Sul de J1 e que é constituída principalmente por margas, estimando-se ter uma espessura de cerca de 450 m;
4. a unidade J4 que aflora em grande extensão a sul de J3 e que inclui dolomitos grosseiros de cor vermelha e os calcários cinzentos avermelhados. A espessura mínima parece ser 500 m. O topo desta unidade apresenta um nível bioclástico característico.

Na parte sul da região e cobrindo uma extensa área, encontram-se os sedimentos do Cretácico inferior. Consistem em areias, cascalheiras e margas arenosas e apresentam uma espessura de cerca de 150 m (Manuppella *et al.*, 1987).



**Fig. 3.** mapa geológico da Campina da Luz; adaptado de Bonte (1999).

As formações do Miocénico cobrem as formações do Cretácico e do Jurássico na parte central da região. São constituídas principalmente por calcários e calcarenitos muito fossilíferos e por areias margosas, margas, siltes e argilas. Apresentam-se em camadas subhorizontais podendo atingir 75 m de espessura na parte central da Campina da Luz. É preciso realçar que a variação lateral da litologia é de tal forma grande que se torna difícil qualquer correlação entre sondagens.

Areias e cascalheiras do Plio-Quaternário afloram localmente no centro e perto da costa. A sua espessura é variada e não excede os 20 m. Siltes e argilas do Holocénico existem ao longo dos vales fluviais. Areias de dunas recentes encontram-se na Ilha de Tavira.

Os aquíferos principais são formados pelos calcários e dolomitos do Jurássico e pelos calcários do Miocénico que ocorrem no centro da região. As margas do Cretácico formam o aquífero. Silva (1984) analisou vários ensaios de bombagem realizados nas

formações do Miocénico e do Cretácico e obteve valores de transmissividade que variaram respectivamente entre os 500 e os 2000 m<sup>2</sup>/d e entre os 24 e 30 m<sup>2</sup>/d.

Tal como na região da Campina de Faro, as falhas jogam um papel importante, sendo também as falhas de direcção N-S as que conduzem preferencialmente a água e as NE-SW as que funcionam como barreira ao fluxo.

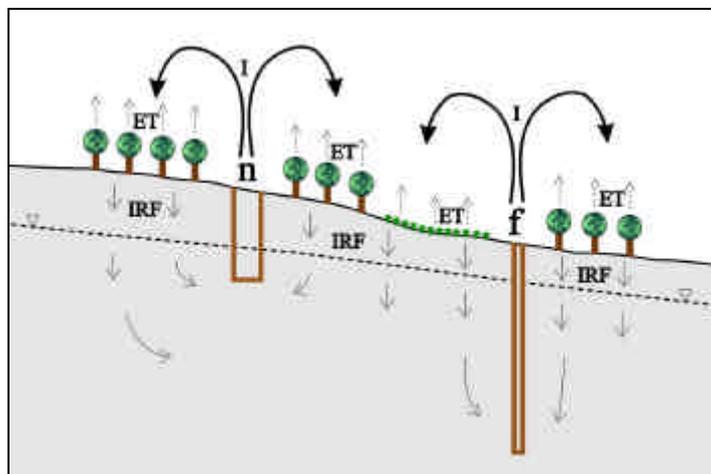
## **CONTAMINAÇÃO POR NITRATOS**

A origem principal da contaminação por nitratos (NO<sub>3</sub>) envolve quase sempre o uso intensivo de fertilizantes nas práticas agrícolas. Os fertilizantes azotados são em geral usados de forma excessiva, e o nitrato é lixiviado chegando rapidamente às águas subterrâneas, devido à sua extrema mobilidade. Pode-se provar no entanto que o aumento das concentrações do ião nitrato não se deve somente ao uso excessivo de fertilizantes, mas que também é induzido por outras práticas agrícolas, nomeadamente pela rega. O processo está ilustrado na figura 4 e pode ser descrito da seguinte maneira:

1. A água subterrânea é extraída das noras e furos e utilizada na rega.
2. Uma fracção pequena dessa água de rega é imediatamente evaporada, enquanto que a maior parte é extraída pelas plantas e transpirada.
3. A fracção da água que retorna ao aquífero, (irrigation return flow), varia consoante o sistema de irrigação utilizado, com o tipo de cultura e com o tipo de solo. Segundo Ritzema (1994), menos de 20% da água retorna ao aquífero. Stigter *et al* (1998) usam o valor de 15% para a Campina de Faro. Esta água de retorno encontra-se extremamente concentrada em sólidos dissolvidos.
4. De regresso ao aquífero a água de retorno vai-se misturar com as águas do aquífero, aumentando assim a concentração dos iões em solução na água subterrânea.

Como se trata de um processo em repetição constante (« **reciclagem cíclica** ») a mineralização total da água subterrânea vai aumentando progressivamente, (figura 4) e se o tempo de residência das águas no aquífero for muito elevado, o resultado traduz-se num aumento da mineralização bastante acentuado. Pelo contrário, se a velocidade de escoamento das águas subterrâneas for rápida, a água do aquífero é constantemente renovada e o aumento da mineralização não se faz sentir de maneira tão acentuada.

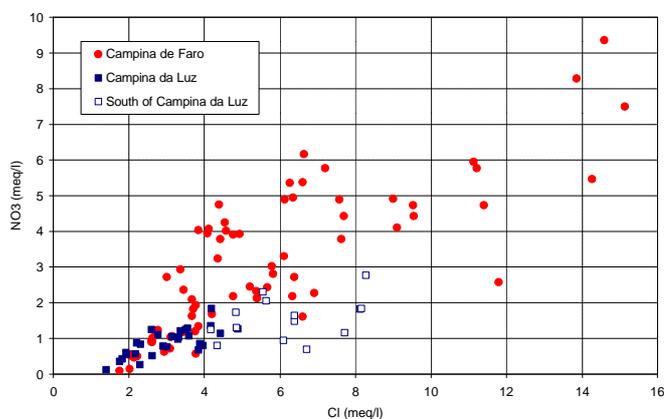
Pode-se por isso concluir que a permeabilidade e o gradiente hidráulico controlam em conjunto a poluição das águas subterrâneas, uma vez que determinam o processo de *reciclagem cíclica* das águas subterrâneas.



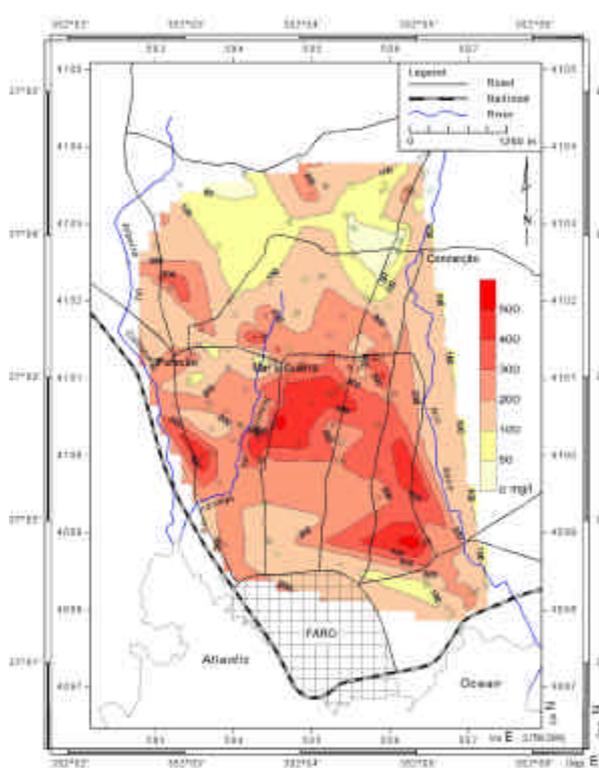
**Fig. 4.** ciclo da água subterrânea incluindo a irrigação; n = nora, f = furo, I = irrigação, ET = evapotranspiração, IRF = irrigation return flow, a fracção da água que retorna ao aquífero,  $\nabla$  = toalha freática

A concentração do ião cloreto é um bom indicador do processo de *reciclagem cíclica*, visto ser considerado um ião conservativo, não participando em processos hidroquímicos. A sua concentração traduz somente a fonte (mistura com águas marinhas, dissolução de evaporitos ou, como neste caso, a evapotranspiração). Stigter *et al* (1998) verificaram um aumento significativo da concentração de cloretos na zona central da Campina de Faro. Igualmente constataram que a concentração em nitratos apresenta a mesma tendência, como pode ser visto na figura 5. Esta figura mostra a relação entre o ião cloreto e o ião  $\text{NO}_3$  para a Campina de Faro e para a Campina da Luz. As amostras de água que sofreram processos de salinização, quer por intrusão marinha, quer por dissolução de evaporitos, foram retiradas da figura, uma vez que fontes adicionais de cloreto enviezam a relação  $\text{NO}_3\text{-Cl}$ . Verifica-se que o aumento da concentração em cloretos induzido somente pelos processos de *reciclagem cíclica* da água subterrânea é acompanhado por um aumento da concentração de nitratos. Este processo parece lógico, uma vez que o ião nitrato quando presente na água subterrânea se comporta, tal como o ião cloreto, como ião conservativo. Contudo, ao contrário do ião Cloreto, o ião  $\text{NO}_3$  joga um papel importante na zona não saturada, onde a sua concentração é influenciada pela adição de fertilizantes, pela absorção pelas plantas, e outros processos hidroquímicos,

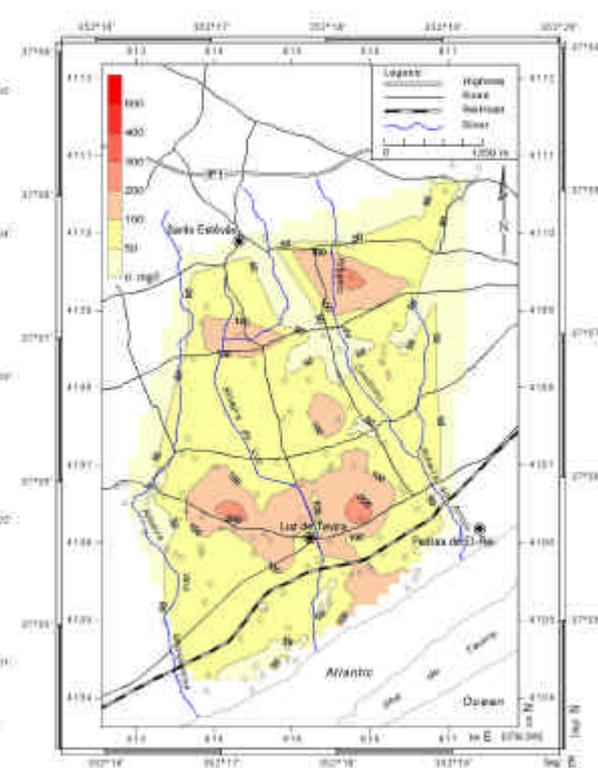
tais como nitrificação de outros compostos azotados, ou até de desnitrificação. Isto explica a dispersão de valores em torno da relação linear entre o Cl e o NO<sub>3</sub> da figura 5.



**Fig. 5.** projecção dos valores de NO<sub>3</sub> versus Cl para amostras de águas subterrâneas da Campina de Faro, Campina da Luz e a Sul da Campina da Luz.



**Fig. 6:** distribuição espacial da concentração dos nitratos (NO<sub>3</sub>) na Campina de Faro

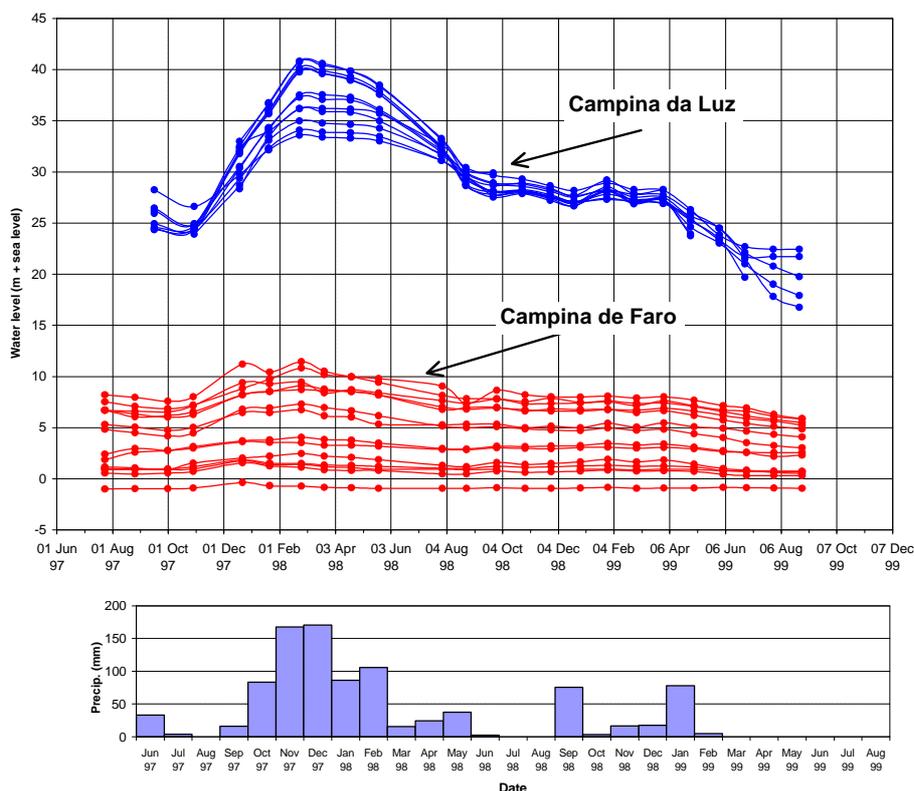


**Fig. 7:** distribuição espacial da concentração dos nitratos (NO<sub>3</sub>) na Campina da Luz.

Nas figuras 5,6 e 7 observa-se claramente as diferenças existentes entre a Campina de Faro e a Campina da Luz, no que diz respeito às concentrações de NO<sub>3</sub> e de Cl. Na Campina de Faro as concentrações de Cl chegam a atingir valores de 15 meq/l (≈ 530 mg/l) e os valores de concentração em NO<sub>3</sub> excedem os 9 meq/l (≈ 560 mg/l), o que

indica a forte influência dos processos de *reciclagem cíclica* das águas subterrâneas. Estes valores ocorrem precisamente na zona central da Campina de Faro, onde o aquífero superior, composto por areias moderadamente permeáveis, se apresenta coberto por siltes e argilas do Holocénico muito pouco permeáveis, que atingem os 10 m de espessura (figura 2). A hipótese, de que o processo de *reciclagem cíclica* das águas subterrâneas se desenvolve bastante nesta área, devido às condições geológicas, parece lógica. A Figura 6, que mostra a distribuição da concentração de NO<sub>3</sub> nos aquíferos superiores, confirma a teoria.

O aquífero principal da região central da Campina da Luz é formado principalmente por calcários bastante carsificados, embora ocorram outras litologias (Figura 3). O escoamento das águas subterrâneas é mais rápido e esse facto contribui para que o proceso de *reciclagem cíclica* das águas subterrâneas seja menos «eficiente» e como consequência os valores da concentração de nitratos (figura 7) e de cloretos não são tão altos como na região da Campina de Faro, sendo respectivamente inferiores a 5 meq/l ( $\approx 180$  mg/l) e 2 meq/l ( $\approx 120$  mg/l). Valores mais elevados encontram-se apenas nas áreas situadas a Sul da Campina da Luz, onde o aquífero é constituído pelas margas pouco permeáveis do Cretácico, de permeabilidade baixa, de novo devido à maior eficiência dos processos de *reciclagem cíclica* das águas subterrâneas.



**Figura 8.** variações temporais dos níveis piezométricos, medidas no aquífero arenoso da Campina de Faro e no aquífero calcário do Miocénico da Campina da Luz; as precipitações correspondentes ao mesmo período e caídas na estação udométrica de Estói, estão igualmente representadas no gráfico de barras subjacente.

As variações temporais dos níveis piezométricos nas noras são bons indicadores para o comportamento hidráulico dos aquíferos superiores. Nas duas áreas de estudo, foram feitas medições mensais em cerca de 60 noras, durante dois anos. Na figura 8 estão representadas as séries temporais de 14 noras localizadas no aquífero arenoso da zona central da Campina de Faro e de 12 noras do aquífero calcário do Miocénico da Campina da Luz. Contrapôs-se a precipitação medida na estação udométrica de Estói, a 2 km a Norte de Campina de Faro.

Para o período chuvoso de 97/98 precipitaram cerca de 690 mm (valor ligeiramente superior à média da região). Os níveis freáticos do aquífero calcário da Campina da Luz subiram cerca de 10 a 15 m, enquanto que níveis na Campina de Faro não ultrapassaram os 4 m. No período chuvoso 98/99 as chuvas caídas foram em muito menor quantidade, o que resultou numa descida acentuada da toalha freática no aquífero da Campina da Luz. Pelo contrário, não se verificou uma descida equivalente na Campina de Faro (figura 8). As grandes amplitudes, verificadas no aquífero calcário da Campina da Luz, indicam claramente que a recarga e a descarga se processam de forma rápida e que a velocidade das águas subterrâneas é elevada.

## O MODELO DRASTIC

O modelo DRASTIC foi desenvolvido por Aller *et al.* (1987) para o US Environmental Protection Agency (EPA). Foi criado com o objectivo de avaliar a qualidade das águas subterrâneas e o seu *potencial de poluição* para áreas extensas, utilizando o seu enquadramento hidrogeológico. As letras que formam a palavra DRASTIC representam 7 parâmetros hidrogeológicos. (Tabela 1).

Letra	Significado	Factor de ponderação
D	Profundidade do topo de aquífero	5
R	Recarga do aquífero	4
A	Material do aquífero	3
S	Tipo de Solo	2
T	Topografia	1
I	Impacto da zona não saturada	5
C	Conductividade hidráulica	3

**Tabela 1.** Significado de DRASTIC.

Cada parâmetro, por sua vez subdivide-se em diferentes classes e a cada classe é atribuído um índice. Assim, para se qualificar uma determinada área por um índice DRASTIC, deve-se determinar primeiro o índice respectivo de cada parâmetro que, de acordo com a classe em que se situa, pode variar entre 1 e 10. Para se obter o índice final, a cada parâmetro é atribuído um factor de ponderação (tabela 1), que se baseia na importância relativa desse factor no potencial de poluição.

O modelo pressupõe que o contaminante é introduzido à superfície, que se infiltra juntamente com a água e que se move à mesma velocidade que esta. O modelo só deve ser aplicado, segundo Aller *et al.* (1987), a regiões com áreas superiores a 0,4 km<sup>2</sup> e aquíferos superiores. Os parágrafos seguintes descrevem sumariamente os 7 parâmetros.

Profundidade (m)	Índice	Recarga (mm/ano)	Índice
< 1,5	10	< 51	1
1,5 - 4,6	9	51 - 102	3
4,6 - 9,1	7	102 - 178	6
9,1 - 15,2	5	178 - 254	8
15,2 - 22,9	3	> 254	9
22,9 - 30,5	2		
> 30,5	1		

A profundidade do topo de aquífero (**D**) indica a espessura da zona não saturada que é atravessada pelas águas de infiltração que arrastam consigo o contaminante até atingirem o aquífero. A toalha freática varia sazonalmente. Nos períodos de maior precipitação **Tabela 2.** Profundidade do topo de aquífero. **Tabela 3.** Recarga do aquífero (quífero) e são estes, os que devem ser utilizados no cálculo dos índices DRASTIC. Quanto menor for a profundidade da toalha freática, maior vai ser a probabilidade do contaminante atingir o aquífero, daí os valores da tabela 2.

A **Recarga (R)** é a quantidade de água por unidade de superfície do solo que contribui para alimentar o aquífero. É o principal veículo transportador do contaminante. A recarga resulta primariamente da fracção da precipitação que não é evapotranspirada nem escoada superficialmente. Nas regiões estudadas existe uma entrada extra que resulta do fluxo de retorno das águas de irrigação. Quanto maior for a recarga, maior será a probabilidade do contaminante chegar à toalha freática (tabela 3).

Natureza do aquífero	Índice*
Xisto argiloso, argilito	1 - 3 (2)
Rocha metamórfica/ígnea	2 - 5 (3)

Rocha metamórfica/ígnea alterada	3 - 5 (4)
"Till" glacial	4 - 6 (5)
Arenito, calcário e argilito estratificados	5 - 9 (6)
Arenito maciço	4 - 9 (6)
Calcário maciço	4 - 9 (8)
Areia e balastro	4 - 9 (8)
Basalto	2 - 10 (9)
Calcário carsificado	9 - 10 (10)

\*Entre parentesis os índices típicos

**Tabela 4.** Material do Aquífero.

O material do **Aquífero (A)** determina a mobilidade do contaminante que o atravessa. Segundo a tabela 4, quanto maior for o tempo de residência do contaminante no aquífero, mais atenuado será o efeito do contaminante. O **Solo (S)** corresponde à parte superior da zona vadosa ou não saturada, que se caracteriza pela actividade biológica intensa. Em conjunto com o meio aquífero determinam a quantidade de água de percolação que atinge a superfície freática. Os solos argilosos e siltosos possuem maior capacidade de retenção da água e portanto aumentam o tempo de permanência do contaminante na zona não saturada (tabela 5).

Solo	Índice	Declive (%)	Índice
Fino ou ausente	10	< 2	10
Balastro	10	2 - 6	9
Areia	9	6 - 12	5
Turfa	8	12 - 18	3
Argila agregada e /ou expansível	7	> 18	1
Franco arenoso	6		
Franco	5		
Franco siltoso	4		
Franco argiloso	3		
Lodo	2		
Argila não agregada e não expansível	1		

A **Topografia (T)** também influi no cálculo do índice DRASTIC, pois quanto maior o declive, menor será o potencial de poluição, pois maior será escorrência superficial (tabela 6). O **Impacto (I)** da zona não saturada determina o tempo que o contaminante leva a percorrer até chegar à toalha freática (tabela 7). Para os cálculos do índice utiliza-se a camada que **Tabela 5.** Tipo de Solo **ao escoar** **Tabela 6.** Topografia

Zona não saturada	Índice*	K (m/d)	Índice
Camada confinante	1	0 - 4,1	1
Argila/Silte	2 - 6 (3)	4,1 - 12,2	2
Xisto argiloso, argilito	2 - 6 (3)	12,2 - 28,5	4
Calcário	2 - 5 (3)	28,5 - 40,7	6
Arenito	2 - 7 (6)	40,7 - 81,5	8
Arenito, calcário e argilito estratificados	4 - 8 (6)	> 81,5	10

Areia e balastro com percentagem significativa de silte e argila	4 - 8 (6)
Areia e balastro	4 - 8 (8)
Basalto	2 - 10 (9)
Calcário carsificado	8 - 10 (10)

\*Entre parentesis os índices típicos

A **C** Condutividade hidráulica (**C**) determina a quantidade de água que atravessa o aquífero. A profundidade da zona não saturada (**D**) determina a quantidade de água que se infiltra no aquífero. A Condutividade hidráulica (**C**) e a profundidade da zona não saturada (**D**) diminuem o tempo que o contaminante leva a percorrer o aquífero (tabela 8).

O modelo DRASTIC foi aplicado pela primeira vez em Portugal e à escala do país, por Lobo-Ferreira e Oliveira (1993). Oliveira e Lobo-Ferreira (1998) aplicaram igualmente o modelo à região de Faro. Os parâmetros hidrológicos, identificados nos índices, são sem dúvida de extrema importância para a determinação da vulnerabilidade de uma área à contaminação das águas subterrâneas. No entanto, deve-se ter muito cuidado na análise e no significado de cada parâmetro envolvido na classificação, para evitar conclusões erradas.

Uma análise qualitativa, sem grandes preocupações de cálculos, foi efectuada nas duas regiões mencionadas. Evitou-se de propósito a atribuição de valores, mesmo quando se dispunha de dados de campo. Tal opção justifica-se pela dificuldade em quantificar alguns parâmetros do DRASTIC e porque o objectivo era verificar se o modelo, aplicado a duas regiões distintas, correspondia às situações reais de contaminação existentes.

Os parâmetros **D**, **R**, **S** e **T** podem-se considerar como tendo valores semelhantes para as duas áreas. No que diz respeito à profundidade da toalha freática (**D**), os valores mais elevados corresponderam ao mês de Fevereiro de 1998, que se seguiram a uma situação de maior precipitação. Os valores chegaram a menos de 5 m de profundidade em ambas as áreas. A Recarga (**R**) pode ser considerada idêntica para ambas as regiões, uma vez que as condições climáticas são semelhantes e a taxa de irrigação a mesma (informação obtida através de inquéritos aos agricultores).

Em relação ao tipo de Solo (**S**), foram feitas análises granulométricas em amostras do solo da Campina de Faro o que permitiu a sua classificação como solo franco arenoso. Kopp *et al* (1989) distinguem um nível superior franco-argilo-arenoso, passando para franco-argiloso em profundidade. Os mesmos autores classificam os solos da Campina da Luz como solos francos e franco-argilo-arenosos.

A Topografia (T) é em geral a mesma para ambas as regiões – essencialmente plana. Existem pequenas elevações, mas os declives raramente excedem os 2%.

As grandes diferenças entre as Campinas de Faro e da Luz de Tavira reflectem-se nos parâmetros **A**, **I** e **C** que dizem respeito ao material do **Aquífero**, ao **Impacto** da zona vadosa e à **Condutividade** hidráulica. Como se referiu anteriormente, o material do **Aquífero** (A) do aquífero superior da Campina de Faro, que é constituído principalmente por areias finas, é menos permeável que o material da Campina da Luz, que por sua vez é constituído fundamentalmente por calcários e calcarenitos carsificados. Segundo o modelo DRASTIC, quanto menos permeável for o aquífero, menos vulnerável ele é, e por isso a Campina de Faro apresenta um índice menor, que está indicado na Tabela 9 com o sinal <. Quanto ao **Impacto** da zona vadosa (I) e como na região central da Campina de Faro ocorrem siltes e argilas de baixa permeabilidade, o valor do índice que se obtém é também menor (<). Finalmente, em relação à **Condutividade** hidráulica (C) – parâmetro difícil de estimar – ela está relacionada com o parâmetro A, e por isso deve ser considerada também menor (<) para o aquífero da Campina de Faro, o que de acordo com o modelo DRASTIC, vai ser reflectido por um menor índice.

Parâmetro	Campina de Faro	Campina da Luz
Profundidade da toalha freática	=	=
Recarga do Aquífero	=	=
Material do Aquífero	<	>
Tipo de Solo	=	=
Topografia	=	=
Impacto da zona vadosa	<	>
Condutividade	<	>
Índice de Vulnerabilidade DRASTIC	<<<	>>>

**Tabela 9.** Representação qualitativa do modelo DRASTIC nas áreas de estudo.

A tabela 9 mostra os resultados da análise qualitativa que se efectuou para os dois aquíferos, segundo a metodologia que se aplica no modelo DRASTIC. Como se pode observar, a Campina de Faro qualifica-se como menos vulnerável à contaminação que a Campina da Luz, o que não condiz de modo nenhum com o estado de contaminação actual em ambos os aquíferos. A razão para este resultado é, sem dúvida, o papel dominante que o processo de *reciclagem cíclica* das águas subterrâneas tem na determinação do grau de contaminação dos dois aquíferos e que não é contemplado pelo modelo DRASTIC, que à partida não assume qualquer uso para o solo. Tal como foi referido atrás, o processo de *reciclagem cíclica* das águas subterrâneas é condicionado

pela baixa permeabilidade, enquanto que o modelo DRASTIC por sua vez considera essa baixa permeabilidade como sinónimo de menor vulnerabilidade à contaminação.

## **CONCLUSÕES**

A grande discrepância entre a vulnerabilidade à contaminação calculada pelo modelo DRASTIC e o estado real da contaminação das águas subterrâneas das duas Campinas, deve-se ao facto do modelo DRASTIC se restringir apenas à determinação da velocidade de propagação de um contaminante, ou seja, ao tempo de chegada do contaminante ao aquífero. É verdade que o contaminante é mais facilmente transportado até ao aquífero, quando os níveis da toalha freática são elevados, quando a camada de solo é fina e quando as permeabilidades da zona não saturada e saturada são elevadas. Contudo o modelo DRASTIC não estima outros factores realmente importantes, que são determinantes para a susceptibilidade de uma região à contaminação das águas subterrâneas, tais como a proporção e a persistência do contaminante. Recorda-se que a definição de vulnerabilidade de Lobo Ferreira e Cabral (1987) tem implícita a noção de «carga de contaminante imposta» que na realidade não é contemplada pelo modelo DRASTIC.

Em conclusão: a qualidade de água do aquífero arenoso superior da Campina de Faro é mais sensível à carga da contaminação (por nitratos) imposta, devido ao maior tempo de residência das águas contaminadas no aquífero. As práticas de irrigação têm um papel dominante na deterioração das águas subterrâneas, uma vez que induzem o processo de reciclagem e o aumento da mineralização das águas. Este facto faz com que o modelo DRASTIC não tenha sucesso na avaliação da vulnerabilidade dos aquíferos, quando o uso do solo altera significativamente o ciclo hidrológico natural e o equilíbrio hidroquímico.

Finalmente, aconselha-se a que, sempre que se disponha de informação suficiente, se proceda a uma verificação dos resultados do modelo DRASTIC, tal como foi feito no presente trabalho. Só assim se poderá progredir na avaliação da vulnerabilidade de aquíferos à contaminação, no sentido da análise do risco de contaminação ou vulnerabilidade integrada, tal como foi definido na introdução.

## **BIBLIOGRAFIA**

- Aller, L.; Bennet, T.; Lehr, J.H. and Petty; R.J., 1987. DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeological settings. U.S. EPA Report 600/2-85/018.
- Almeida, C. and Silva, M.L., 1987. Incidence of agriculture on water quality at Campina de Faro (South Portugal). In: Fourth Symposium on Hydrogeology. Hidrogeologia-y-Recursos-Hidraulicos, vol. 12, Asociacion Espanola de Hidrologia Subterranea, Madrid (Espanha), pp. 249-257.
- Bonte, M., 1999. Isotopic and hydrochemical study after the hydrochemical processes under irrigated land in Luz de Tavira, Algarve, Portugal. Vrije Universiteit Amsterdam (Holanda).
- Kopp, E.; Sobral, M.; Soares, T.; Woerner, M., 1989. Os solos do Algarve e as suas características. Vista Geral. Faro (Portugal).
- Lobo-Ferreira, J.P. and Cabral, M., 1991. Proposal for an Operational Definition of Vulnerability for the European Community's Atlas of Groundwater Resources. In: the framework of The Meeting of the European Institute for Water, Groundwater Work Group, Brussels (Bélgica), Feb. 1991.
- Lobo-Ferreira, J.P. and Oliveira, M.M., 1993. Desenvolvimento de um Inventário das Águas Subterrâneas de Portugal. Caracterização dos Recursos Hídricos Subterrâneos e Mapeamento DRASTIC da Vulnerabilidade dos Aquíferos de Portugal. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Relatório 179/93 - GIAS.
- Loureiro, N.S. and Coutinho, M.A., 1995. Rainfall changes and rainfall erosivity increase in the Algarve (Portugal). Catena 24: 55-67.
- Manuppella, G.; Ramalho, M.; Antunes, A.T.; Pais, J., 1987. Notícia explicativa da folha 53-B, Tavira. Serviços Geológicos de Portugal. Lisboa (Portugal).
- Oliveira, M.M and Lobo-Ferreira, J.P. Cartografia automática da vulnerabilidade de aquíferos com base na aplicação do método DRASTIC, 1998. In: 4º Congresso da Água, a Água Como Recurso Estruturante do Desenvolvimento, Lisboa (Portugal), 23 - 27 Mar. 1998.
- Ritzema, H.P. (Editor-in-Chief)., 1994. Drainage principles and applications, International Institute for Land Reclamation and Improvement. Wageningen (Holanda), 1125 pp.

- Schneider, M., 1981. Die Grundwasserverhältnisse im südlichen Plano de Faro (Algarve, Südportugal) - Entnahme, Erschließung und Anreicherungsmöglichkeiten. Institut für Geologie und Paläontologie, Technischen Universität, Berlin (Alemanha), 107 pp.
- Silva, A.V.; Portugal, A.; Freitas, L., 1986. Modelo de fluxo subterrâneo e salinização dos aquíferos costeiros entre Faro e Fuzeta. *Algarb - estudos regionais* 3-4: 75-112.
- Silva, M.L., 1989. Hidrogeologia do Miocénico do Algarve. Universidade de Lisboa (Portugal).
- Silva, O.M., 1984. Hidrogeologia do Algarve Oriental. Universidade de Lisboa (Portugal).
- Stigter, T.Y.; van Ooijen, S.P.J.; Post, V.E.A.; Appelo, C.A.J.; Carvalho Dill, A.M.M., 1998. A hydrogeological and hydrochemical explanation of the groundwater composition under irrigated land in a Mediterranean environment, Algarve, Portugal. *Journal of Hydrology*, 208, pp. 262-279.
- Vrba, J. and Zaporozec, A. (eds.), 1994. Guidebook on mapping groundwater vulnerability. *IAH International Contributions to Hydrogeology* 16, 156 pp.