

PLANEAMENTO E GESTÃO DO USO DO SOLO AGRÍCOLA PARA UMA PROTECÇÃO SUSTENTÁVEL DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Um caso de estudo em Portugal

Teresa E. LEITÃO

Doutora em Hidrogeologia, Investigadora Principal com Habilitação, Núcleo de Águas Subterrâneas – LNEC/DHA, Av. do Brasil, 101 P-1700-066 Lisboa, tleitao@lnec.pt

Luís G. S. OLIVEIRA

Eng.º do Ambiente e Mestre pelo IST, no Núcleo de Águas Subterrâneas, Av. do Brasil, 101 P-1700-066 Lisboa, loliveira@lnec.pt

João Paulo LOBO FERREIRA

Doutor em Engenharia Civil, Investigador-Coordenador, Núcleo de Águas Subterrâneas – LNEC/DHA, Av. do Brasil, 101 P-1700-066 Lisboa, lferreira@lnec.pt

Isabel LARANJEIRA

Eng.ª Agrícola da Universidade de Évora, Aquisição de Serviços do Projecto FCT no LNEC

RESUMO

Nesta comunicação apresentam-se os resultados alcançados no âmbito do projecto POCI/AGR/57719/2004 "Metodologias para um melhor planeamento e gestão do uso do solo agrícola atendendo à vulnerabilidade dos aquíferos à poluição difusa", que decorreu entre Maio de 2005 e Junho de 2009, financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia.

O projecto foi coordenado pelo LNEC e contou com a participação do ICAM (Instituto de Ciências Agrárias e Mediterrânicas), do IMAR (Instituto do Mar) e do IST (Instituto Superior Técnico).

O objecto deste projecto enquadra-se nos propósitos mais vastos da Directiva-Quadro da Água e da Directiva das Águas Subterrâneas, de alcançar o Bom estado das águas subterrâneas até 2015, através de um conjunto de actuações destinadas à protecção das massas de água e à redução gradual da poluição em massas de água já poluídas. Estes objectivos só serão alcançados através de medidas de gestão integrada e sustentável dos recursos hídricos ao nível da bacia hidrográfica, onde as opções de uso e ocupação do solo tenham em consideração se as drenagens geradas por esses usos são compatíveis com as imposições de qualidade pretendidas para as águas de jusante.

Apresentam-se os resultados da avaliação, em dois anos consecutivos, 2006 e 2007, dos efeitos de diferentes práticas agrícolas e culturas nos solos e nas águas de jusante (rega, escorrência, zona vadosa e subterrânea) para duas parcelas em Ferreira do Alentejo. Esses dados foram modelados para, de forma prospectiva, se simularem os efeitos que diferentes cenários de ocupação do solo teriam nas águas subterrâneas da região. O trabalho dá resposta ao objectivo global do projecto de "Estimular a utilização futura de culturas mais sustentáveis e de melhores práticas agrícolas que possam contribuir para diminuir o risco de degradação da qualidade das águas subterrâneas".

Palavras-chave: poluição difusa, águas subterrâneas, modelação, sustentabilidade, Directiva-Quadro da Água.

1 INTRODUÇÃO

Neste artigo descrevem-se os principais resultados do projecto POCI/AGR/57719/2004 intitulado "Metodologias para um melhor planeamento e gestão do uso do solo agrícola atendendo à vulnerabilidade dos aquíferos à poluição difusa", com base no relatório final do projecto (cf. Leitão *et al.*, 2009).

O projecto centra-se na análise do impacte que diferentes práticas agrícolas podem ter na qualidade das águas subterrâneas de jusante, através de uma análise integrada e interdisciplinar. O estudo baseou-se num trabalho experimental desenvolvido em três parcelas regadas numa pequena bacia hidrográfica em Ferreira do Alentejo, onde se analisaram, para os anos de 2006 e 2007, os efeitos de diferentes práticas agrícolas nos processos que interferem na migração dos poluentes de origem agrícola (fertilização de solos), para diferentes meios (solos, zona vadosa e águas subterrâneas), com ensaios onde se analisam diversas culturas (milho, girassol, melão) e dois solos com características diferentes.

Apresentam-se alguns dos resultados alcançados nomeadamente sobre:

- Caracterização dos locais de estudo e instalação de ensaios de campo em 3 parcelas agrícolas.
- Descrição das práticas agrícolas adoptadas, das culturas instaladas, dos processos de rega e dos modos de fertilização utilizados.
- Descrição do esquema experimental de colheita de dados de qualidade dos solos e das águas, tanto na área circundante às parcelas como no interior das mesmas, relativamente a águas de rega, de valas de drenagem, de escorrência, da zona vadosa e águas subterrâneas.
- Monitorização da evolução da qualidade dos solos e das águas resultante da actividade agrícola, para a cultura do milho, do melão e do girassol.
- Modelação do escoamento e do transporte de massa em águas subterrâneas para análise das interacções entre as águas subterrâneas e as de superfície; modelação do balanço de massas; cálculo da recarga.
- Análise dos resultados obtidos e sua interpretação.
- Modelação de diversos cenários de ocupação do solo para a região, considerando os diferentes tipos de solos presentes na área e as práticas de fertilização de cada cultura.

Os dados obtidos permitiram verificar, de forma clara, a influência das práticas agrícolas na qualidade das águas e solos a jusante, com diferenças assinaláveis entre culturas e práticas associadas.

2 LOCAIS E PRÁTICAS AGRÍCOLAS

Os trabalhos desenvolveram-se em duas parcelas regadas por aspersão com "center pivot" na área de estudo comum ao projecto RECOQUAR "Rede de Controlo da Qualidade da Água de Rega", que decorreu no COTR entre Fevereiro de 2005 e 2007 (COTR, 2008), numa bacia hidrográfica situada na "Infra-estrutura 12" do perímetro de rega do Alqueva (Ferreira do Alentejo). As áreas seleccionadas para os ensaios de campo localizam-se nos Montes da Mancoca e do Pinheirinho (cf. Fig. 1).

Estas duas áreas têm as características necessárias pretendidas para a realização dos ensaios, designadamente:

- Condições de campo em termos de culturas previstas e de apoio logístico necessário.
- Inserção na área de regadio do perímetro de rega de Alqueva.
- Inserção numa pequena bacia hidrográfica, com possibilidade de acesso a registos dos caudais de jusante da bacia (estação hidrométrica), com infra-estruturas de monitorização de águas subterrâneas (furos e poços) e onde é possível ter acesso aos caudais de rega e fertilizantes aplicados.
- Solos com características de permeabilidade interessantes para o estudo da migração de iões

em profundidade.

- Possibilidade de acesso aos registos da precipitação e da evapotranspiração na Estação Meteorológica do Outeiro, pelo COTR, a dotações de rega e a quantidade de fertilizantes aplicados.

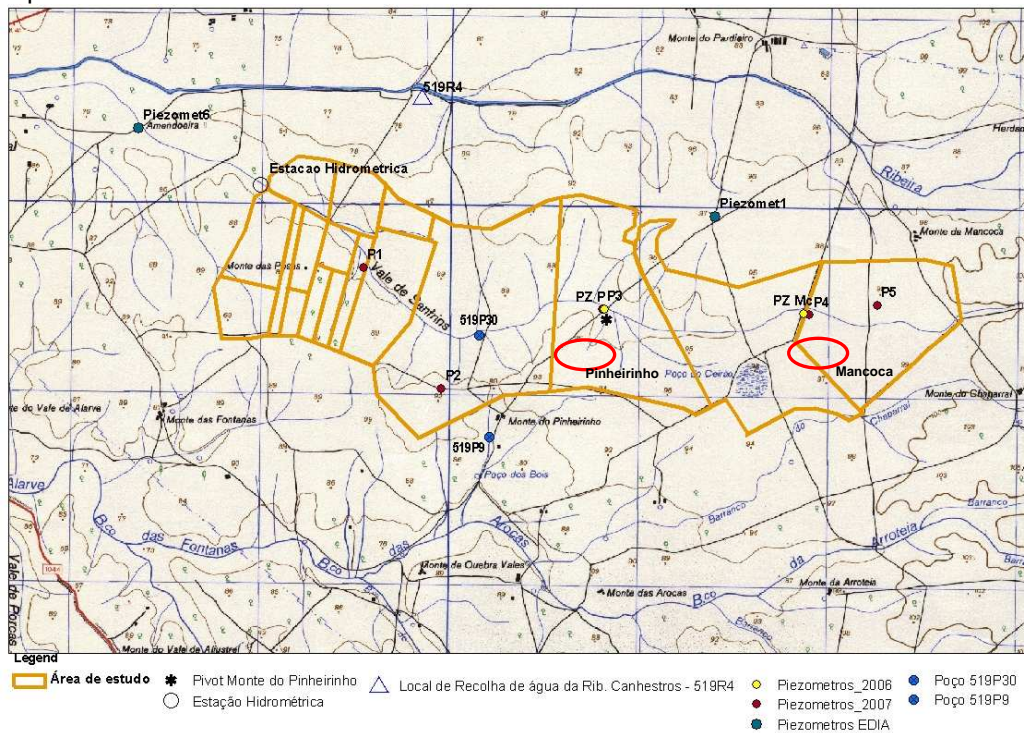


Fig. 1 - Área de estudo e respectivas infra-estruturas de monitorização (a vermelho assinalam-se os Montes da Mancoca e do Pinheirinho)

A escolha das modalidades, das culturas instaladas e das práticas de gestão agrícola foi decidida pelos agricultores. Foram estabelecidas três modalidades nas parcelas experimentais, com diferentes culturas para cada ano (cf. Fig. 2 e Quadro 1).



Fig. 2 - Aspecto da cultura do milho no Monte da Mancoca, duas semanas após a sementeira

Quadro 1 - Modalidades ensaiadas nos trabalhos de campo de 2006 e 2007

Localização	Designação	Descrição da modalidade
2006		
Monte da Mancoca	MMAFC	Milho, com adubação de fundo e cobertura (fertirrigação)
Monte do Pinheirinho	PMAFLC	Milho, com adubação de fundo localizada e cobertura (fertirrigação)
	PGSAFC	Girassol, sem adubação de fundo e sem cobertura (embora tenha havido escorrência superficial da água da cultura do milho)
2007		
Monte da Mancoca	MM	Milho para grão, adubação de fundo e cobertura (fertirrigação)
Monte do Pinheirinho	PML1	Melão, rega gota-a-gota (fertirrigação)
	PML2	Melão, rega gota-a-gota (fertirrigação)

O esquema experimental montado nas três áreas regadas, descrito nas próximas secções, teve como objectivo base a colheita de amostras de solo e de águas para análise química ao longo do período de ensaio e em vários locais, dentro e fora das parcelas, embora só as primeiras sejam referidas neste artigo. Relativamente às práticas agrícolas adoptadas, cujas datas de rega e dotações aplicadas são apresentadas em pormenor em Leitão *et al.* (2009):

1) Em 2006, o método de rega utilizado nas duas parcelas foi a aspersão com rampas rotativas (center-pivot). A área regada em cada "pivot" é de cerca de 23 hectares.

No Monte da Mancoca foram realizadas, entre 24 de Maio e 11 de Setembro de 2006, 62 regas, num total de 574 mm. No Pinheirinho foram realizadas 77 regas no milho até 4 de Setembro, tendo sido aplicados um total de 630 mm. No girassol, a dotação aplicada foi de 109 mm em 12 regas efectuadas.

No Monte da Mancoca foi realizada adubação de fundo aquando da sementeira e a fertilização de cobertura consistiu em várias fertirregas ao longo da campanha de rega com adubo líquido Humifosfato 15 que doseia 30% de azoto, nitro-zinco e cálcio+magnésio. No Monte do Pinheirinho, na cultura do girassol, não foi realizada adubação de fundo nem de cobertura.

2) Em 2007, o método de rega utilizado na parcela da Mancoca foi a aspersão com rampa rotativa (center-pivot). O método de rega utilizado nas parcelas do Pinheirinho foi a rega localizada "gota-a-gota".

No Monte da Mancoca foram realizadas, entre 28 de Abril e 8 de Setembro de 2007, 87 regas do milho, num total de 672 mm. No Pinheirinho foram aplicadas 65 regas no melão entre 8 de Junho e 5 de Setembro, tendo sido aplicados um total de 213 mm. A fertilização no Monte da Mancoca foi idêntica ao referido em 1).

3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA

3.1 Considerações gerais

Os trabalhos específicos de caracterização físico-química corresponderam ao desenvolvimento das seguintes tarefas:

- Caracterização físico-química das parcelas em termos de:
 - Solos (às profundidades de 0 - 15 cm, 15 - 30 cm, 30 - 45 cm, 45 - 60 cm e 60 - 75 cm) (Fig. 3): textura, densidades aparente e real e porosidade, teor de humidade, armazenamento de água no solo e carga hidráulica, desenvolvimento radical, curvas pF, concentração iónica e capacidade de troca cationica.

- Águas, relativamente a águas de rega, das valas de drenagem, de escorrência, da zona vadosa e subterrâneas: níveis/volumes, parâmetros físico-químicos e concentrações iónicas.
- Observação e quantificação do desenvolvimento radical da cultura do milho, nas diferentes unidades pedológicas, comparando com a técnica de sementeira e disponibilidade de água no solo. Utilização do método do minirizotróo (cf. Fig. 4) utilizado pela Universidade de Évora.
- Análise dos resultados obtidos e sua interpretação preliminar.



Fig. 3 - Recolha de monolitos de solo pelos técnicos da Universidade de Évora



Fig. 4 - Tubo de acesso para minirizotróo e Endoscópio BTC Minirhizotron Camera Systems, Universidade de Évora

Os locais para a amostragem de águas foram seleccionados tendo em vista a análise dos efeitos dos processos culturais na evolução da sua qualidade ao longo dos ensaios. Esta análise foi efectuada à macro escala, i.e. na área circundante às parcelas e à escala local, i.e. no interior das parcelas. Nesta comunicação apenas a 2.ª será analisada.

A qualidade das águas no interior das parcelas foi analisada para cada caso de estudo para: água de escorrência à superfície do solo (em dois anéis ou talhões de escorrência); água da zona vadosa a três profundidades diferentes (através de seis cápsulas de Teflon®, duas a cada profundidade) e na zona saturada, em dois piezómetros localizados a jusante dos ensaios instalados para este estudo. As Fig. 5 a Fig. 7 ilustram a instalação desses equipamentos.

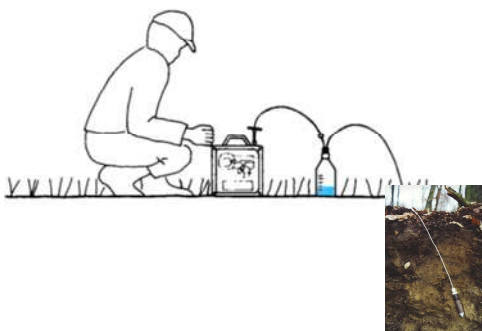


Fig. 6 - Cápsulas de Teflon® - zona vadosa



Fig. 5 - Talhão de escorrência



Fig. 7 - Piezómetro - águas subterrâneas

Foram registados no local os valores da condutividade eléctrica, pH, Eh e temperatura. Os parâmetros NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , Cl^- e COT foram analisados em laboratório, mensalmente.

4 RESULTADOS DA MONITORIZAÇÃO

4.1 Solos

Verifica-se que o solo da Mancoca apresenta uma textura essencialmente franco-arenosa nos primeiros 45 cm do horizonte do solo, profundidade a partir da qual surge uma camada mais impermeável de textura franco-argilo-arenosa que passa depois a argilo-arenosa. Esta variação tem como consequência principal a formação de um nível de água localmente muito elevado onde são retidas as águas de rega, com importantes repercussões ao nível da concentração de sais, conforme se verá mais adiante.

O solo do Pinheirinho é um solo com textura franco-argilo-arenoso que passa a argilo-arenoso dos 60 a 75 cm. Em termos gerais, a permeabilidade destes solos é claramente inferior aos da Mancoca, aspecto que dificulta a infiltração das águas e favorece a escorrência superficial.

A Fig. 8 apresenta um gráfico com a variação da qualidade dos solos nas três parcelas em 2006 para os catiões maiores e os nitratos, para 0 - 20 cm, 20 - 40 cm e 40 - 60 cm.

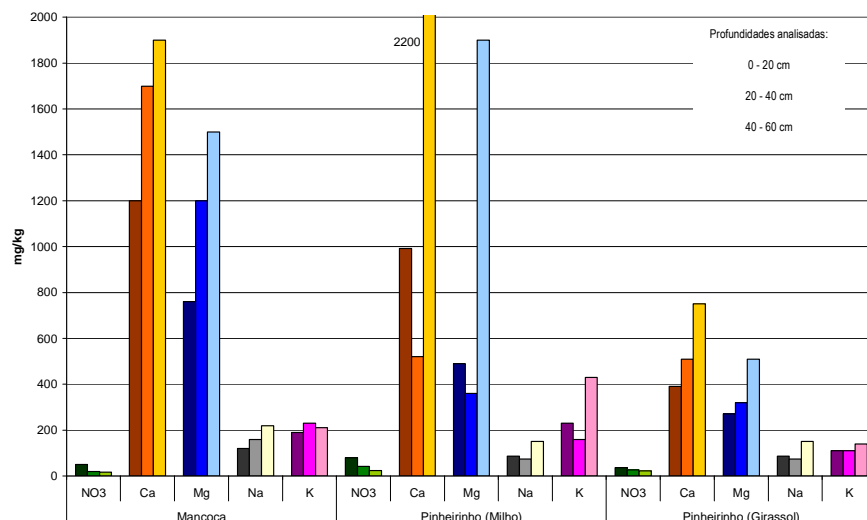


Fig. 8 - Resultados da qualidade dos solos para os catiões maiores e nitrato, nas três áreas de estudo, antes da sementeira

A análise da Fig. 8 permite observar o maior teor em nitratos no primeiro horizonte do solo, decrescendo depois em profundidade. As concentrações antes da sementeira revelam-se já bastante elevadas com teores que oscilam entre 17 e 80 mg NO₃/kg.

Os resultados do desenvolvimento radical para a cultura do milho, mostram que a densidade radical verificada aos 30 cm do perfil do solo (horizonte A), se destacou na modalidade MMAFC, face à modalidade PMAFLC (cf. Quadro 1), onde se praticou a sementeira com mobilização na zona. A dificuldade de penetração das raízes no perfil do argiloso do solo nesta modalidade fez com que o sistema radical das plantas se desenvolvesse sobretudo na camada superficial, não havendo desta forma uma exploração adequada da água em profundidade.

4.2 Águas

4.2.1 Águas de escorrência

As Fig. 9 e Fig. 10 apresentam os resultados obtidos para os quatro ensaios com rega por aspersão (na rega gota-a-gota não houve escorrência) onde se destaca o aumento da concentração de nitratos causado pela fertilização, embora nem sempre os aumentos estejam directamente relacionados e haja diversos períodos para os quais não se conseguiu efectuar a amostragem (cf. Leitão *et al.*, 2009). Estas concentrações na água de escorrência repercutem-se na qualidade das águas de jusante, na zona vadosa, nas valas de drenagem e nas ribeiras, bem como nalguns piezómetros localizados mais próximos das parcelas, como se verá nas secções seguintes.

De forma a ter um termo de comparação, projectaram-se na Fig. 9 os valores da água de rega sem adição de fertilizantes à água. É ainda de referir que as águas do Pinheirinho (girassol) que apresentam valores mais elevados em nitratos são águas que foram recolhidas nas depressões deixadas pelos rodados do pivot, e não nos anéis de escorrência, pelo que as suas concentrações elevadas se podem dever a uma elevada evaporação da água com consequente concentração de sais.

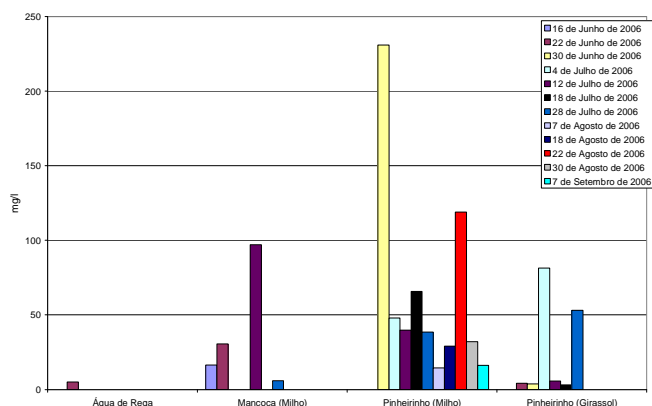


Fig. 9 - Variação do teor em nitratos nos anéis e talhões de escorrência nos três casos de estudo para o ano de 2006

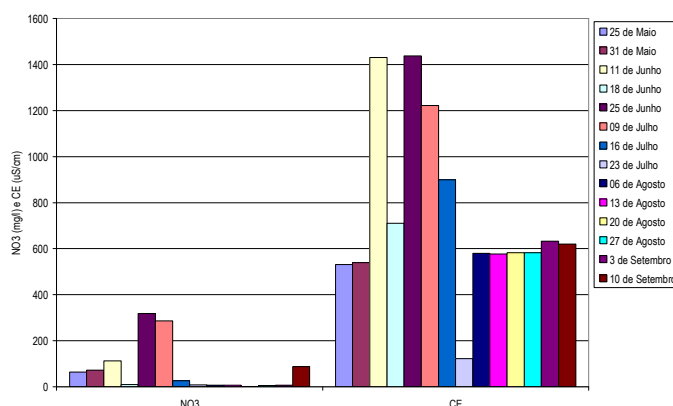


Fig. 10 - Variação da condutividade eléctrica e nitratos no talhão de escorrência da Mancoca em 2007

4.2.2 Águas da zona vadosa

As Fig. 11 e Fig. 12 apresentam uma projecção dos resultados das análises efectuadas semanalmente entre Maio e Setembro, em 2006 e 2007, a três profundidades, 20, 40 e 60 cm, na água recolhida nas cápsulas instaladas na zona vadosa para a condutividade eléctrica, para 4 dos 6 ensaios.

A condutividade eléctrica da água apresenta os valores mais elevados na modalidade Mancoca milho, para o ano 2006, com os valores de CE a aumentar ao longo do período de rega em todas as camadas do perfil do solo, atingindo o maior valor (10,79 mS/cm) no caso da amostragem realizada a 7 de Agosto, à profundidade de 60 cm. É, aliás, na camada situada a maior profundidade (60 cm) onde se verificam os valores mais elevados de CE (também para o ano 2007), o que se explica pelo facto dos sais terem sido arrastados para a camada subjacente até atingirem o nível mais impermeável localizado a cerca de 60 cm (cf. Fig. 11). Em 2006 é, ainda, possível observar aos 60 cm uma tendência para a diminuição da condutividade eléctrica depois de 7 de Agosto, numa fase com rega mas já sem quaisquer fertilizações. Em 2007 as amostras que foi possível recolher na Mancoca foram limitadas aos primeiros períodos de rega, uma vez que o equipamento de recolha foi por diversas vezes danificado inviabilizando a amostragem regular. Os valores apresentam-se muito inferiores aos de 2006.

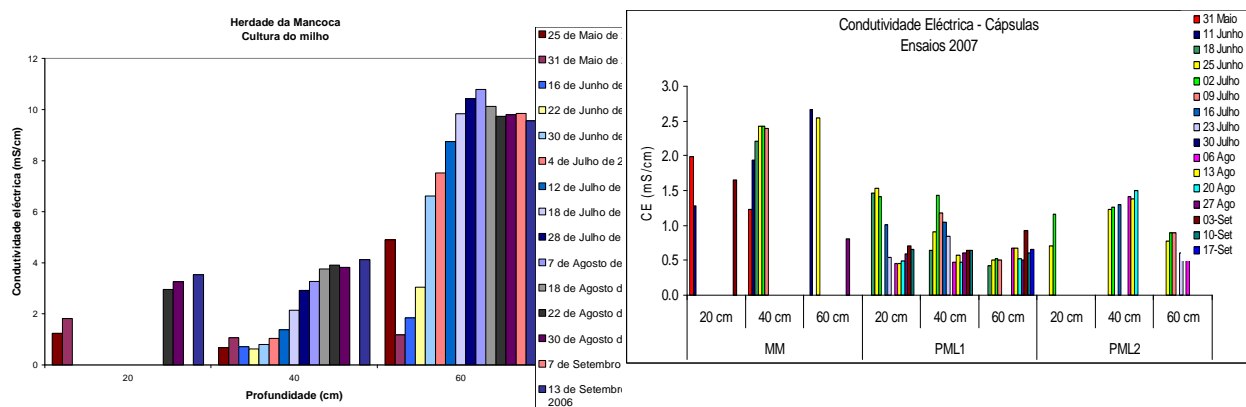


Fig. 11 - Variação da condutividade eléctrica na zona vadosa para diferentes parcelas de ensaio, em 2006 na Herdade da Mancoca (à dta.) e em 2007 nos 3 casos de estudo (à esq.)

Para as parcelas do Pinheirinho, os valores máximos registados para a condutividade eléctrica foram bastante mais baixos, em ambos os anos. Observa-se que os valores de CE nestas duas parcelas são, geralmente, mais elevados nos primeiros centímetros do solo, possivelmente devido à sua menor capacidade de infiltração em comparação com os solos da Mancoca, permitindo maior disponibilidade para a evapotranspiração da água, com conseqüente acumulação de sais.

Em relação aos restantes parâmetros medidos na água da zona vadosa optou-se nesta comunicação por seleccionar os nitratos para análise dessa variação. Leitão *et al.* (2009) apresentam de forma mais detalhada os resultados obtidos para todos os parâmetros medidos. Observa-se para a cultura do milho da Mancoca elevadas concentrações quer em catiões quer em aniões, em especial do nitrato em 2006. Para 2007, apesar da ausência de muitos dados, é notória a diminuição da concentração iónica.

Nos ensaios da cultura de melão do Pinheirinho, em 2007, os resultados obtidos denotam aumentos muito acentuados de concentração em nitratos resultantes da fertirrigação inicial possivelmente aplicada na última quinzena de Junho. Durante o final do mês de Julho e parte do mês de Agosto observa-se uma diminuição destas concentrações (cf. Fig. 12) devido à sua diluição com a água de rega. As concentrações voltam posteriormente a aumentar possivelmente como resultado da lavagem dos solos induzida pela precipitação ocorrida.

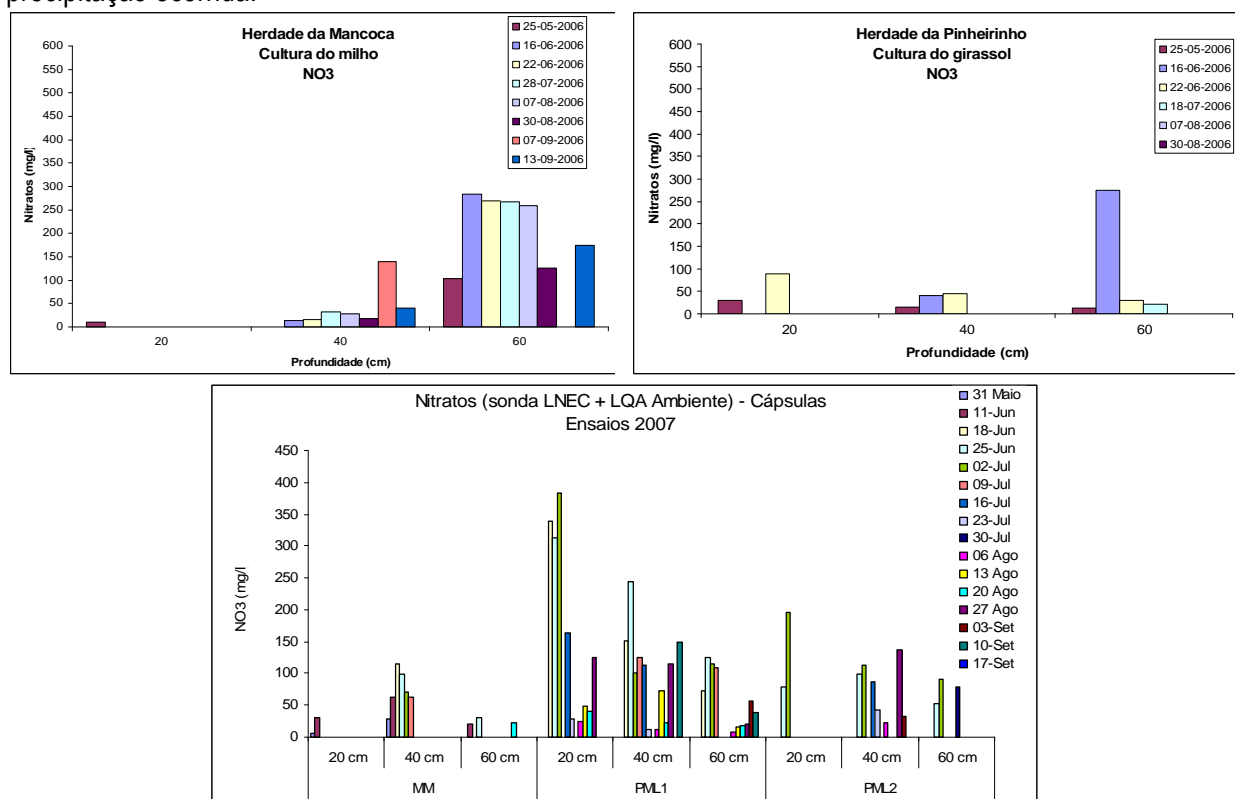


Fig. 12 - Variação das concentrações em nitratos na zona vadosa, a três profundidades, ao longo período dos ensaios de 2006 (em cima) e 2007 (em baixo), para o ensaio da Mancoca e do Pinheirinho

4.2.3 Águas subterrâneas

Leitão *et al.* (2009) apresentam em detalhe os resultados obtidos para a qualidade das águas subterrâneas nas parcelas de ensaio na Mancoca e no Pinheirinho e na área envolvente das mesmas, para os dois anos de ensaio. Neste artigo apenas se apresentam os resultados relativos à condutividade

eléctrica e aos nitratos.

Os resultados de 2006 permitem verificar que são águas com condutividades eléctricas extremamente elevadas, denotando-se uma variação dos seus valores durante os períodos de ensaio. A Fig. 13 apresenta a variação do ião nitrato ao longo do período cultural, em 2006. São claros os efeitos da variação da concentração dos nitratos por aplicação de fertilizantes, com cerca de 1 a 2 meses de tempo de chegada aos piezómetros desde a data da sua aplicação.

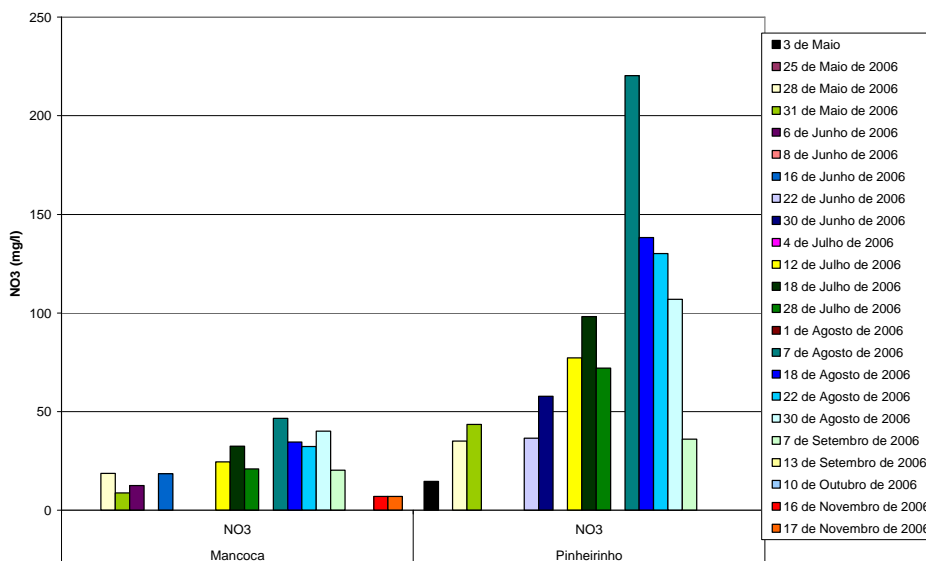


Fig. 13 - Variação das concentrações em nitrato nos dois piezómetros (< 2 m) dentro das parcelas ao longo do período dos ensaios, em 2006

As Fig. 14 e Fig. 15 apresentam uma síntese dos resultados de 2007 para a condutividade eléctrica e a concentração em nitratos, respectivamente, em novos furos com cerca de 10 m instalados em 2007 em toda a área da bacia (Fig. 1).

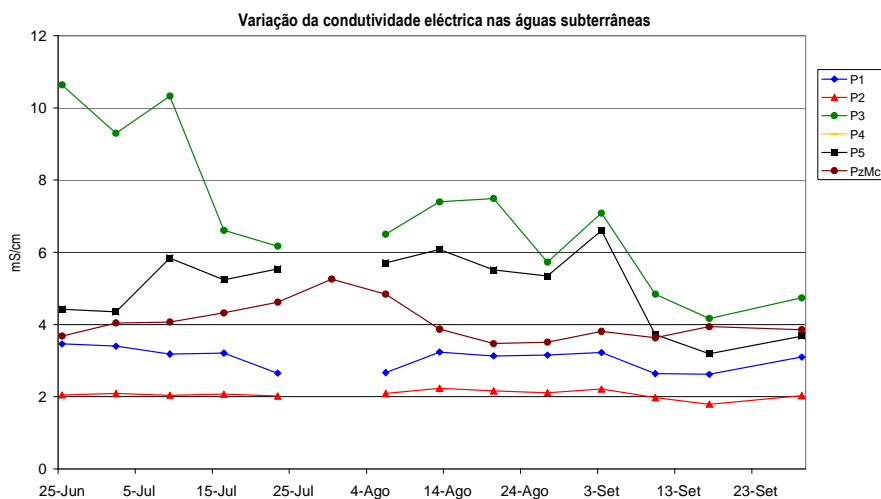


Fig. 14 - Variação da condutividade eléctrica nas águas subterrâneas em 2007

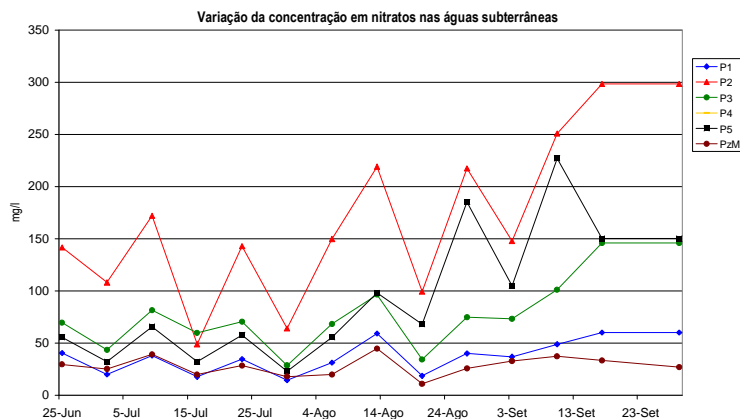


Fig. 15 - Variação da concentração em nitratos nas águas subterrâneas em 2007

Os valores de condutividade eléctrica (cf. Fig. 14) apresentam-se relativamente estáveis ao longo dos meses quando comparados com os registados nos piezómetros de profundidade inferior a 2 m localizados no seio das parcelas. Apenas no P3 e P5 parece haver aumento da CE durante os meses de irrigação. Esta observação terá por base o maior tempo de percolação dos fertilizantes até aos piezómetros mais profundos.

A Fig. 15 permite registar que, a partir do final do mês de Agosto, há um aumento da concentração dos nitratos, especialmente notório para os piezómetros P2, P3, e P5, possivelmente resultante da aplicação de fertilizantes, com cerca de 2 meses de tempo de chegada aos piezómetros desde a data da sua aplicação. Este processo já havia sido registado nos dados recolhidos nos trabalhos experimentais levados a cabo em 2006.

5 MODELAÇÃO NUMÉRICA DE CENÁRIOS DE OCUPAÇÃO

O objectivo da modelação do escoamento e do transporte de massa neste estudo foi permitir efectuar uma análise dos efeitos que diferentes ocupações agrícolas do solo podem ter na qualidade das águas subterrâneas de jusante. O modelo (cf. Fig. 16) foi desenvolvido em regime estacionário.

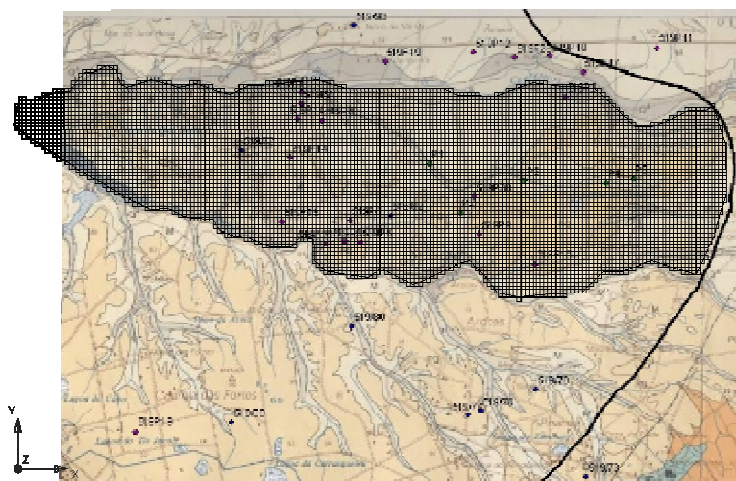


Fig. 16 - Área modelada (3 camadas, 67 linhas e 192 colunas)

Foi inicialmente considerado um modelo regional alargado de 18,6 km² cujo limite superior foi definido pela ribeira de Canhestros e o limite inferior pelos barrancos da Chaminé, do Vale Alarve, das Fontanas, das Arocas e da Arroteia. A fronteira a leste é definida pelo próprio limite do sistema aquífero da Bacia de Alvalade (Fig. 17). Foram modeladas 3 camadas com malhas de área 50 x 50 m e profundidade variável. As linhas de drenagem foram obtidas através da carta militar n.º 519 à escala 1/25000. O modelo da bacia hidrográfica de interesse corresponde a uma superfície de 3,3 km² tendo sido as condições iniciais definidas pelos resultados do modelo regional.

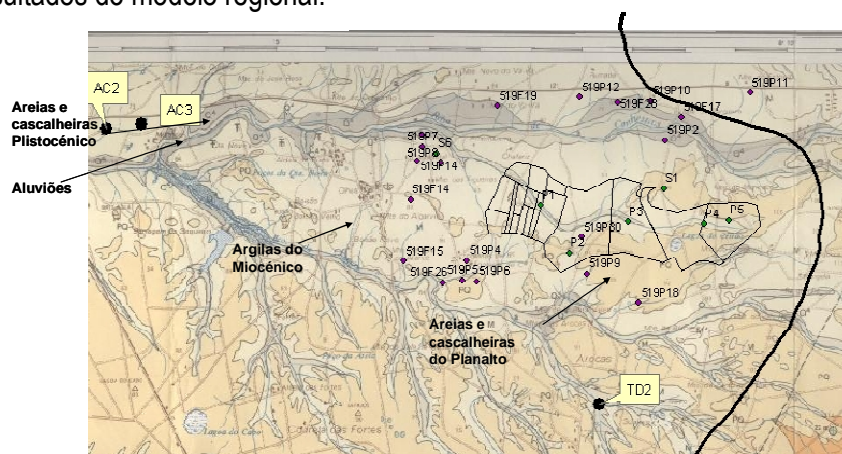


Fig. 17 - Carta geológica da área de estudo

A caracterização geológica da área de estudo foi realizada com base na carta geológica n.º 42-D Aljustrel, à escala 1/50 000 (cf. Fig. 17) e em três colunas litológicas: AC2, S6 e S1 (fornecidas pelo Doutor Eduardo Paralta, a quem se agradece). O Quadro 2 contém uma síntese hidrogeológica da área de estudo.

Quadro 2 - Caracterização hidrogeológica da área de estudo

Camada	Espessura máxima (m)	Características	Condutividade Hidráulica (m/d) (kh → kx=ky)
1	3,5	Aluviões (a) e material da época do Plistocénico (areias e cascalheiras – Q4 e Q3); Areias e cascalheiras do Planalto (PQ); Argilas pertencentes ao Miocénico (M).	1 para os aluviões e material da época do Plistocénico; 0,7 para as areias e cascalheiras do Planalto; 0,1 para as argilas
2	3,7	Argila	0,1
3	12,8	Areias	0,95

O valor da recarga foi retirado do Plano de Bacia Hidrográfica do rio Sado (Lobo-Ferreira *et al.*, 1999), calculado através do modelo BALSEQ (Lobo-Ferreira, 1981). A recarga artificial foi obtida através dos valores de irrigação das parcelas (COTR, 2008), tendo-se considerado que 20% da água de rega se infiltra. A calibração regional foi realizada recorrendo à média anual da piezometria de vários anos de seis pontos de aferição (cf. Fig. 17), de acordo com o Quadro 3.

Quadro 3 - Piezometria dos seis pontos usados na calibração do modelo

Pocos	M	P	Média anual (m)
519P2	195130	119030	78,61
519P6	192420	117130	76,54
519P8	191900	118730	76,39
519P9	194000	117230	88,02
519P5	192210	117140	76,73
519P14	191570	118750	76,77

O modelo numérico regional do escoamento subterrâneo desenvolvido no âmbito do presente estudo permitiu confirmar que o escoamento subterrâneo principal se faz no sentido das ribeiras (sudeste para noroeste). A Fig. 18 mostra, em detalhe, a piezometria modelada para a área de estudo, sendo possível verificar que o seu valor varia, sensivelmente, entre os 80 e os 100 m. É possível identificar um sentido de fluxo principal, em direcção ao canal de drenagem que atravessa a área. Existem também outros fluxos mais locais, mas com menor significado, resultado da topografia do terreno e das linhas de drenagem.

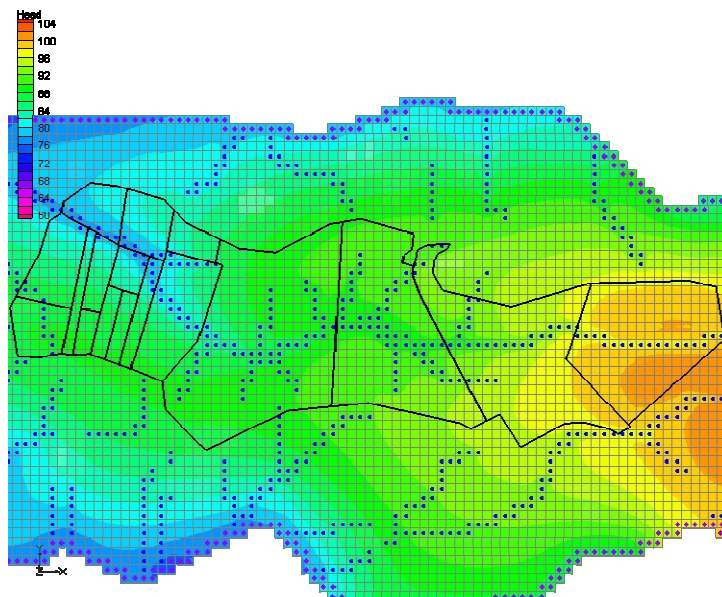


Fig. 18 - Piezometria na área de estudo

A modelação da qualidade da água foi desenvolvida utilizando o modelo MT3D (<http://www.modflow.com/mt3d/mt3d.html>) que corre na interface GMS. Este modelo numérico, a três dimensões, permite simular o transporte de substâncias em ambientes hidrogeológicos complexos.

A modelação transporte de poluentes desenvolvida simulou o início do ano 2007 e começou por representar os cenários reais desse ano, em termos das culturas existentes. Para tal, assumiu-se uma série de condições iniciais e simplificações descritas em Leitão *et al.* (2009). A ocupação do solo com as culturas praticadas no local de estudo no ano de 2007 é referida no Quadro 4.

Quadro 4 - Situação base, correspondente ao ano de 2007 (ver Fig. 1 para localizar as parcelas)

Parcelas	Cultura
9094	Par1 Milho
9096	Par2 Olival
9112	Par3 Melão
9111	Par4 Tomate
9115	Par5 <i>Meloa</i>
9116	Par6 <i>Melão</i>
9133	Par7 <i>Tomate</i>
9134	Par8 <i>Beterraba</i>
Varios	Par9 <i>Olival</i>

Para fins de modelação, considerou-se que todas as culturas que continham olival, ou estavam em pousio, estavam cultivadas com olival (uma cultura que não exige grande quantidade de água). No Quadro 4 encontra-se assinalado em itálico um conjunto de pequenas parcelas que, para efeitos de modelação, foram agregadas, considerando-se assim que formam uma grande parcela (válido apenas para os cenários 5 onde se simulam novas ocupações dos solos; nos outros casos são utilizadas as ocupações parcelares referidas no Quadro 4).

Os valores iniciais de saída do modelo, em nitratos (NO_3^-), correspondem aproximadamente aos valores medidos no campo nas campanhas de monitorização realizadas em 2007. Considerou-se a existência de um resíduo de contaminação resultante das práticas agrícolas anteriores. Este resíduo foi comprovado por medições no terreno em 2007 e por uma modelação simples, entre os anos de 2005 e 2007, tendo os seus valores sido assumidos como condições iniciais para este modelo.

Sobre a modelação da situação actual foram analisados diversos cenários de potencial ocupação do solo, para os anos 2007 a 2015, que correspondem ao cenário de base (ano de 2007) sobre o qual é alterada uma cultura de cada vez numa só parcela (cf. as alterações no Quadro 5), verificando-se os seus efeitos nas restantes parcelas. Assim, por exemplo, no cenário 1A é alterada a parcela 1 para olival (inicialmente era milho), mantendo-se as restantes com as irrigações e culturas praticadas no ano de 2007, conforme o Quadro 4. No cenário 1B a parcela 1 é alterada para melão mantendo-se as culturas das restantes parcelas, e assim sucessivamente.

Quadro 5 - Culturas consideradas para cada cenário durante o período simulado

Cenários	A	B	C	D	E	F
1	Par1 - Olival	Par1 - Melão	Par1 - Tomate	Par1 - Meloa	Par1 - Beterraba	
	Restantes parcelas iguais ao Quadro 4					
2	Par2 - Milho	Par2 - Melão	Par2 - Tomate	Par2 - Meloa	Par2 - Beterraba	
	Restantes parcelas iguais ao Quadro 4					
3	Par3 - Milho	Par3 - Olival	Par3 - Tomate	Par3 - Meloa	Par3 - Beterraba	
	Restantes parcelas iguais ao Quadro 4					
4	Par4 - Milho	Par4 - Olival	Par4 - Melão	Par4 - Meloa	Par4 - Beterraba	
	Restantes parcelas iguais ao Quadro 4					
5	Par5 - Milho	Par5 - Olival	Par5 - Melão	Par5 - Meloa	Par5 - Beterraba	Par5 - Tomate
	Restantes parcelas iguais ao Quadro 4					

Os valores de NO_3^- foram medidos para cada parcela no final de cada ano, ou seja, o fim do ano 2007 corresponde a um ano com determinada cultura, o fim do ano 2008 a dois anos com determinada cultura, e assim sucessivamente.

Considerou-se uma concentração inicial nas parcelas de 10 mg/l de nitrato e igual a 0 fora das mesmas. O Quadro 6 contém informação referente às práticas agrícolas desenvolvidas na área de estudo. Os valores do volume de água (m^3/ha) para rega foram obtidos através do cálculo da média registada para cada cultura nos anos 2005/06 e 2007. Estes valores, assim como a quantidade de azoto aplicado às culturas por ano foram obtidos em COTR (2005) e COTR (2006).

O nitrato removido pela planta corresponde à quantidade mínima deste nutriente que é consumida pela cultura, ou seja, que é removida do solo. Estes valores foram obtidos em Soveral Dias (1994 *in* Leitão *et al.*, 2009). A quantidade de nutriente em excesso que fica no solo (coluna "azoto a poluir" no Quadro 6) resulta da diferença entre a quantidade de azoto que é aplicada e a que é removida pela cultura.

Realça-se, porém, que a entrada de azoto não é constante ao longo do ano, ou seja, existem

períodos específicos em que este nutriente é aplicado às culturas. Para o milho, beterraba e tomate a fertilização é feita entre Maio e Julho. No caso do olival, o período é entre Abril e Outubro, e para o melão e meloa entre Junho e Setembro. Este ciclo de entradas foi respeitado no modelo.

A coluna "volume a diluir (por aplicação)" (cf. Quadro 6) contém a quantidade de água que se infiltra no solo, ou seja, representa a recarga artificial resultante da irrigação das parcelas. Este valor corresponde a cerca de 20% a 40% da precipitação. Neste caso, considerou-se que 20% da dotação de rega ia para a recarga.

Por fim, a concentração de entrada no modelo (última coluna do Quadro 6) foi obtida pela diluição da massa por hectare (kg/ha) que fica após o consumo da planta pelo volume (m³/ha), o que corresponde a 20% da rega (admitiu-se que o azoto só entra no meio devido à influência da rega).

Quadro 6 - Volume de rega e quantidade de azoto aplicado na área de estudo

Cultura	Volume água (m ³ /ha)	Azoto aplicado (kg/ha)/ ano	Azoto removido min (kg/ha)	Azoto a poluir (kg/ha)	Volume a diluir (por aplicação) (m ³ /ha)	N (mg/l)
Beterraba	7100	189	132	57	1420	40,14
Melão	2875	120	49	71	575	123,48
Meloa	1600	120	49	71	320	221,88
Milho	6800	360	83	277	1360	203,68
Olival	900	30	26	4	180	22,22
Tomate	6500	150	63	87	1300	66,92

A Fig. 19 ilustra dois exemplos dos diferentes cenários obtidos para 31 de Dezembro de 2015 para as parcelas modeladas e os valores da concentração de nitrato (em mg/l) de saída. A corrida do modelo deu origem a diferentes cenários (cinco por cada parcela, excepto na parcela 5 onde se obtiveram 6 cenários). Dentro do conjunto de cenários é possível verificar que os casos que correspondem ao cultivo de meloa são aqueles em que se verificam os piores resultados, com um acréscimo de nitratos, face à situação de referência. Os cenários que apresentam melhores resultados correspondem à cultura da beterraba e olival.

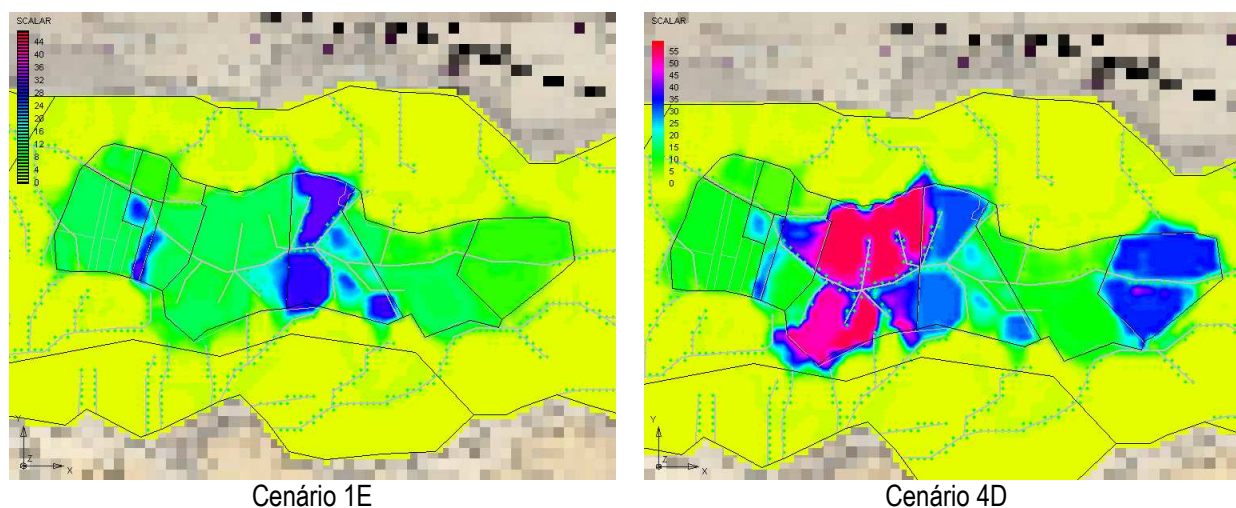


Fig. 19 - Exemplo da concentração em nitratos para dois dos cenários modelados

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apresentam-se os resultados dos ensaios efectuados nos anos de 2006 e 2007, para as culturas do milho, melão e girassol, realizados em três parcelas regadas, uma no Monte da Mancoca e as outras duas no Monte do Pinheirinho, correspondentes a 2 solos diferentes.

Os ensaios realizados consistiram na análise dos efeitos das duas culturas referidas na qualidade dos diferentes meios atravessados pela água de rega: solos, zona vadosa e águas subterrâneas. Estes meios foram analisados em diversas datas e a diferentes profundidades ao longo dos ensaios, de forma a acompanhar a sua evolução no espaço e no tempo. Essa análise foi complementada com análises das características físico-químicas dos solos. Além da observação da evolução da qualidade dos solos e das águas no interior das parcelas foram, ainda, analisadas as águas da zona envolvente às parcelas, em poços, em cinco novos piezómetros instalados em 2007, bem como nas águas do canal de rega e das valas de drenagem localizadas a jusante das parcelas regadas. Os dados obtidos permitiram verificar de forma clara a influência das práticas agrícolas na qualidade das águas e solos a jusante.

A informação de campo obtida e analisada nos dois primeiros anos do projecto foi modelada em termos do estudo do escoamento e do transporte de poluentes. Com base nos dados obtidos projectaram-se diferentes cenários dos efeitos que diferentes ocupações do solo podem ter na qualidade dos recursos hídricos de jusante.

AGRADECIMENTOS

O trabalho que se apresenta foi realizado no âmbito do projecto POCI/AGR/57719/2004, financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia a quem se agradece.

Agradece-se às várias pessoas que têm colaborado com os autores deste artigo no trabalho de campo e de laboratório, nomeadamente: (1) aos agricultores senhores Manuel Duarte e Guiomar pela autorização de utilização das suas parcelas regadas e pelo apoio prestado; (2) aos Senhores Custódio Alves e José Lobato Condeças, Técnicos da Universidade de Évora, por todo o apoio prestado na instalação dos piezómetros e na recolha de amostras de solos; (3) aos técnicos do COTR, Engenheiros Luís Miguel Boteta e Hilário Catronga pelo apoio na instalação dos piezómetros e na cedência de informação sobre as datas, dotações de rega e fertilizações; (4) aos técnicos do Laboratório de Solos e Laboratório de Hidrologia da Universidade de Évora, pela realização dos ensaios de caracterização textural, de densidades do solo, de porosidade e de teor de humidade e (5) ao Doutor Eduardo Paralta e Prof. Maria da Conceição Cunha, colegas do IST e do IMAR a colaborar neste projecto, pelo apoio de campo, cedência de dados hidrogeológicos e acompanhamento de parte dos trabalhos realizados.

BIBLIOGRAFIA

- COTR, 2008 - "Rede de Controlo da Qualidade da Água de Rega – RECOQUAR". Relatório Final. Beja.
- LEITÃO, T.E., LARANJEIRA, I., OLIVEIRA, L., CUNHA, M.C., PARALTA, E., LOBO-FERREIRA, J.P. e TERCEIRO, P., 2009 - "Metodologias para um Melhor Planeamento e Gestão do Uso do Solo Agrícola Atendendo à Vulnerabilidade dos Aquíferos à Poluição Difusa". Relatório Final. Projecto POCI/AGR/57719/2004, 155 pp.
- LOBO-FERREIRA, J.P., 1981 - "Mathematical Model for the Evaluation of the Recharge of Aquifers in Semiarid Regions with Lack of Hydrological Data", in "Proceedings of EUROMECH 143, Flow and Transport in Porous Media". Rotherdam, A. A. Balkema.
- LOBO FERREIRA, J.P., MOINANTE, M.J., OLIVEIRA, M.M., NOVO, M.E., LEITÃO, T.E., MOREIRA, P. e HENRIQUES, M. J., 1999 - "PBH do Rio Sado. 1.ª Fase. Caracterização dos Recursos Hídricos Subterrâneos. AT 4 - Recursos Hídricos Subterrâneos". Estudo realizado para a Hidroprojecto, Engenharia e Gestão, S.A., 258 pp.