

Modelação da dinâmica da água e dos sais num Aluviossolo regado com águas de diferente qualidade: ensaio de validação do modelo HYDRUS-1D com observações em monólitos

Water and solute transport simulation in a Fluvisol irrigated with waters of different quality: testing the HYDRUS-1D model with observations in soil monoliths

M. C. Gonçalves¹, T. B. Ramos¹, J. Šimůnek², M. J. Neves¹, J. C. Martins¹,
F P. Pires¹ & P. Leitão³

RESUMO

Entre 2001 e 2004 procedeu-se à monitorização dos teores de água e dos cations solúveis Na⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺, às profundidades de 10, 30, 50 e 70 cm, em três monólitos de solo (1.2 m² x 1.0 m de profundidade), construídos num Aluviossolo de textura mediana, situado em Alvalade de Sado, visando o estudo da evolução da salinização e da sodicização do solo em função de diferentes qualidades de água de rega aplicadas.

Os monólitos, cobertos com vegetação natural, foram regados manualmente (10 mm por aplicação), durante o ciclo de rega da região (500 mm) e sujeito à lavagem pela chuva (entre 388 e 570 mm/ano) durante o período remanescente do ano. As águas de rega inicialmente aplicadas apresentavam uma CE de 0,4, 0,8 e 1,6 dS m⁻¹ e um valor de SAR de 1, 3 e 6 (meq L⁻¹)^{0,5}, designadas de A, B e C, respectivamente, mantendo sempre uma relação Ca:Mg =

1:2. No 3º e 4º anos optou-se por aumentar a CE das águas de rega para 0,8, 1,6 e 3,2 dS m⁻¹, mantendo o respectivo equilíbrio entre os cations. O teor de água no solo foi monitorizado às 4 profundidades por TDR e a solução de solo foi amostrada recorrendo a cápsulas porosas instaladas às mesmas profundidades. Foi monitorizada a evolução dos teores de água e de Na⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺ solúveis, da condutividade eléctrica (CE), da razão de adsorção de sódio (SAR) e da percentagem de sódio de troca (ESP) nos três monólitos, às quatro profundidades e ao longo dos 4 anos de ensaio.

A modelação dos processos envolvidos foi efectuada recorrendo ao modelo HYDRUS-1D, o qual se mostrou adequado à simulação dos resultados experimentais. A análise entre os valores medidos e simulados foi feita com recurso à análise de regressão simples, forçada à origem. As equações obtidas apresentaram coeficientes de regressão próximos de 1 e coe-

¹ Est. Agronómica Nacional, Quinta do Marquês, 2784-505 Oeiras, Portugal – Tel: 214 403 500 – Fax: 214 416 011 – E-mail: mc.goncalves@netc.pt; ² Department of Environmental Sciences, University of California, Riverside, CA 92521, USA; ³ Instituto Superior Técnico – MARETEC, Av. Rovisco Pais, 1049-101 Lisboa – Tel: 218 419 424 – Fax: 218 419 423

ficientes de determinação elevados, variando entre 0.985 para o teor de água e 0.797 para o cálcio solúvel. Pode-se considerar que este modelo é uma ferramenta valiosa para previsões a médio/longo prazo da influência da qualidade da água de rega no solo.

ABSTRACT

HYDRUS-1D was used to analyze water flow and solute transport in three soil monoliths ($1.2 \text{ m}^2 \times 1.0 \text{ m}$) that were irrigated during summer months with different quality waters. The soil monoliths were constructed on a Eutric Fluvisol in Alentejo, Portugal. EC of irrigation waters varied between 0.4 and 3.2 dS m^{-1} and SAR between 1 and 6 (meq L^{-1})^{0.5}, maintaining a relation of Ca:Mg equal to 1:2. In the irrigation season, about 500 mm of irrigation water was applied. During the rest of the year, the soil monoliths were subjected to regular rainfall leaching. The objective was to evaluate the effectiveness of the HYDRUS-1D software package to predict water contents and fluxes, concentrations of individual ions (Na^+ , Ca^{2+} and Mg^{2+}), electrical conductivity of soil solution (EC), sodium adsorption ratio (SAR) and exchangeable sodium percentage (ESP) indices under field conditions where salinisation may occur. These variables and indices were monitored from May 2001 to September 2004 at four depths (10, 30, 50, 70 cm) in all three soil monoliths. HYDRUS-1D has successfully described field measurements of overall salinity, individual soluble cations, as well as SAR and ESP with regression coefficients close to 1 and determination coefficients ranging from 0.985 to the water content to 0.797 to the soluble calcium simulation.

INTRODUÇÃO

Nas áreas regadas dos aproveitamentos hidroagrícolas em funcionamento no Baixo Alentejo existe uma diversidade de solos, grande parte dos quais apresentam baixa permeabilidade no horizonte B argílico que pode condicionar desfavoravelmente a necessária lavagem dos sais solúveis veiculados pela água de rega. Por outro lado, a água de rega de alguns desses aproveitamentos hidroagrícolas (Roxo, Campilhas) pode apresentar, nomeadamente em anos secos ou de seca severa, uma má qualidade derivada quer de uma concentração excessiva de sais, quer de uma concentração iónica desequilibrada. Acresce referir que nos próximos 10 a 20 anos serão regados, no Alentejo, mais 110 000 ha com água da nova albufeira recentemente construída no Guadiana, como parte integrante do projecto Alqueva. Muito embora não seja de prever nesta enorme albufeira uma concentração de sais na água devido à sua grande dimensão, é de esperar, em anos secos ou de seca extrema, que a água desta albufeira possa deteriorar-se se considerarmos o efeito prejudicial das descargas de efluentes urbanos e agrícolas provenientes das zonas da bacia espanhola e portuguesa que vão alimentar aquela albufeira.

É necessário estabelecer políticas que permitam minimizar os riscos inerentes ao uso de águas de menor qualidade. Tais políticas deverão ser baseadas no entendimento das leis que regem o movimento da água e o transporte de solutos na região saturada e insaturada do solo, assumindo-se a modelação cada vez mais como uma ferramenta indispensável na previsão da qualidade da água dos aquíferos, na implementação de melhores práticas de rega e de fertilização e na quantificação dos riscos de salinização e sodicização do

solo e necessidades de lavagem do solo. Nas últimas décadas tem-se assistido a um considerável progresso na compreensão e descrição dos processos matemáticos que regem os fenómenos do movimento da água e transporte de solutos na região insaturada do solo (van Genuchten & Šimůnek, 2004, Galvão *et al.*, 2004). Surgiram assim uma grande variedade de modelos analíticos e numéricos para prever os processos de transferência da água e solutos entre a superfície do solo e a toalha freática. Esses modelos são baseados na equação de Richards para o fluxo saturado/insaturado da água no solo e na equação de convecção-dispersão (CDE) para o transporte de solutos. Contudo, apenas alguns modelos mais específicos têm a capacidade de simular o transporte individual dos iões existentes na solução do solo. Os mais utilizados têm sido os modelos LEACHM (Wagenet & Hutson, 1987) e UNSATCHEM (Šimůnek *et al.*, 1996). Mais recentemente foi incorporado este último modelo ao programa HYDRUS-1D (Šimůnek *et al.*, 2005) pretendendo tornar este modelo numa poderosa ferramenta na previsão das concentrações dos iões no solo, dos efeitos da qualidade de água de rega nos aquíferos e na quantificação do volume de água necessário para recuperar solos sódicos e salinos para níveis mais reduzidos de salinidade e de percentagem de sódio de troca (Šimůnek & Valocchi, 2002).

Este trabalho pretende avaliar a eficiência do modelo HYDRUS-1D (Šimůnek *et al.*, 2005) na previsão do teor de água no solo, da concentração individual de iões no solo (Na^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+}), da condutividade eléctrica (CE), da razão de sódio de troca (SAR) e da percentagem de sódio de troca (ESP), comparando os resultados simulados com resultados de campo obti-

dos entre 2001-2004, num Aluviossolo regado com águas de diferente qualidade.

MATERIAL E MÉTODOS

Entre Maio de 2001 e Setembro de 2004, num Aluviossolo Moderno Não Calcário de textura mediana ou Fluvissole Eútrico, construíram-se três monólitos de solo ($1.2 \text{ m}^2 \times 1.0 \text{ m}$ de profundidade) onde foram estudados os efeitos no solo, da aplicação de águas de diferente qualidade. Pormenores relativos à construção dos monólitos, descrição das propriedades químicas e físicas do solo e metodologias utilizadas para as determinar podem ser encontrados, com mais pormenor, em Gonçalves *et al.* (2004). No Quadro 1 apresentam-se as características físicas e químicas consideradas mais importantes do Aluviossolo estudado.

Em cada monólito de solo foram instaladas 2 sondas TDR e 2 cápsulas porosas às profundidades de 10, 30, 50 e 70 cm. O monólito foi regado manualmente (aplicações de 10 mm) de Maio a Agosto. Aplicou-se um total anual de 625 L de água de rega o que corresponde a uma rega total anual de 500 mm. A composição iónica das águas aplicadas em cada monólito é descrita no Quadro 2. As águas foram preparadas com concentrações crescentes de cloreto de sódio, de cálcio e de magnésio (Águas I – B e C) em relação à água disponível na região (Água I - A). Em 2003 e 2004 optou-se por aumentar a composição iónica das águas de rega, mantendo a mesma relação SAR e Ca:Mg (Águas II – A', B' e C'). Após o período de rega (Maio a Agosto) os monólitos foram sujeitos à lavagem pela chuva (Setembro a Abril) variando o total de precipitação entre 445 e 587 mm, consoante o ano em causa.

QUADRO 1 - Características físicas e químicas do solo (condições iniciais)

Profundidade (cm)	0-48	48-85	85-170
Textura	Franco-limosa	Franco-limosa	Franca
AG (g kg ⁻¹)	62	51	61
AF (g kg ⁻¹)	532	468	428
L (g kg ⁻¹)	296	292	282
A (g kg ⁻¹)	110	189	229
Dap (g cm ⁻³)	1.49	1.51	1.61
CE (dS m ⁻¹)	0.20	0.23	0.23
pH (H ₂ O)	5.94	6.58	6.74
Catiões solúveis (meq L ⁻¹)	Ca ²⁺	0.753	0.673
	Mg ²⁺	0.613	0.560
	Na ⁺	0.625	0.990
Cl ⁻ (meq L ⁻¹)	1.991	2.223	2.190
Catiões extraíveis (meq kg ⁻¹)	Ca ²⁺	46.63	58.50
	Mg ²⁺	21.88	27.00
	Na ⁺	1.45	2.16
CTC (meq kg ⁻¹)	69.96	87.66	92.30
SAR (meq L ⁻¹) ^{0.5}	0.756	1.260	1.296
ESP (%)	2.00	2.46	2.35
K (Na/Ca) (mol L ⁻¹) ^{-1/2}	1.93	1.37	1.28
K (Mg/Ca)	0.52	0.50	0.51

CE = condutividade eléctrica do extracto de saturação; CTC = capacidade de troca catiónica; SAR = razão de adsorção de sódio; ESP = percentagem de sódio de troca; K = coeficiente de selectividade de Gapon

A solução do solo foi recolhida através de cápsulas porosas e o teor de água no solo foi monitorizado por TDR, às 4 profundidades (10, 30, 50 e 70 cm), duas vezes por semana, de Maio a Agosto (período de rega), e 1 a 2 vezes por mês no restante período (Setembro a Março) para acompanhar o processo de lavagem dos sais.

Os dados de entrada necessários ao modelo HYDRUS-1D (Šimůnek *et al.*, 2005) para tentar simular o movimento de água e o transporte de solutos no solo foram:

- **Condições atmosféricas.** A evapotranspiração de referência (*ET_o*) foi calculada diariamente, pelo método de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998), a partir dos dados recolhidos na estação meteorológica existente a 10 m do local de ensaio. Estando os monólitos cobertos por vegetação natural, a *ET_o*

foi convertida em evapotranspiração cultural (*ET_c*), multiplicando *ET_o* pelos coeficientes culturais (*K_c*) para pastagem (0.4 na fase inicial, 0.85 para períodos sem rega (Allen *et al.*, 1998) e 1.0 quando regado). A *ET_c* foi dividida nas suas componentes evaporação do solo (*E*) e transpiração da cultura (*T*) através das equações:

$$E = ET_c - T \quad (1)$$

$$T = ET_c \times SCF \quad (2)$$

$$SCF = 1 - \exp(-\alpha_i \times LAI) \quad (3)$$

onde *SCF* é o factor de cobertura do solo, *LAI* é o índice de área foliar (m² m⁻²), tendo sido considerado um valor constante de 3.5 m² m⁻² ao longo do ensaio, e α_i é uma constante que tem em conta a absorção da radiação pela cultura (Ritchie, 1972).

QUADRO 2 - Composição iônica das águas de rega aplicadas em cada um dos monólitos e respectiva classificação de acordo com o US Salinity Laboratory (Richards, 1954)

Monólito		CE	SAR	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Cl ⁻	Classificação USSL
		dS m ⁻¹	(meq L ⁻¹) _{0.5}	meq L ⁻¹				
Águas I	A	0.3	1.0	1.00	1.00	1.00	5.00	C2-S1
	B	0.8	3.0	1.28	2.56	4.16	11.82	C3-S1
	C	1.6	6.0	1.93	3.86	10.21	21.79	C3-S2
Águas II	A'	0.8	1.5	1.85	3.65	2.5	13.5	C3-S1
	B'	1.6	3.0	3.16	6.32	6.52	25.48	C3-S1
	C'	3.2	6.0	5.1	10.2	16.7	47.3	C4-S2

Os valores diários de E e T , juntamente com a precipitação diária (P) ao longo dos quatro anos de ensaio são os parâmetros de entrada necessários ao modelo.

- **Distribuição radicular.** Através de observações visuais ao perfil de solo, foi considerada uma profundidade radicular da vegetação natural relativamente uniforme e mais densa até aos 30 cm, pressupondo-se que aí existiriam 80% das raízes, enquanto que os restantes 20% estariam distribuídos até aos 70 cm de profundidade.
- **Propriedades hidráulicas do solo.** As propriedades hidráulicas do solo foram medidas laboratorialmente em

QUADRO 3 - Parâmetros de entrada do modelo do modelo HYDRUS-1D para as propriedades hidráulicas e transporte de solutos no solo

Parâmetros	0-48	48-85	85-170
	----- cm-----		
θ_r (cm ³ cm ⁻³)	0.050	0.108	0.000
θ_s (cm ³ cm ⁻³)	0.427	0.428	0.373
α (cm ⁻¹)	0.029	0.108	0.040
n	1.21	1.16	1.15
ℓ	-4.39	-5.91	-6.91
K_s (cm dia ⁻¹)	18.2	99.3	21.4
Dispersividade (cm)	5.36	0.68	12.18

amostras no estado natural pelos métodos descritos em Gonçalves, *et al.* (1997). Apesar de existirem, no HYDRUS-1D, vários modelos específicos para parametrizar as propriedades hidráulicas do solo, o utilizado foi o de Mualem-van Genuchten (van Genuchten, 1980). O Quadro 3 apresenta os parâmetros obtidos sendo θ_r e θ_s , respectivamente, os teores de água residual e na saturação, K_s a condutividade hidráulica no estado saturado (cm dia⁻¹) e α , n e ℓ parâmetros de ajustamento que definem a forma das curvas.

- **Parâmetros de transporte de solutos.** Os parâmetros de transporte de solutos (dispersividades) foram obtidos em amostras no estado natural de 9040 cm³, colhidas nas camadas do Aluviossolo em estudo, a partir de distribuições de concentrações observadas e de soluções analíticas da respectiva equação de transporte (equação de convecção-dispersão), com recurso ao programa de estimação não linear de parâmetros CXTFIT 2.1 (Toride *et al.* 1995). As colunas de solo foram preparadas e saturadas com água, a partir da sua base inferior, segundo o procedimento descrito em Mallants *et al.* (1994). Após saturação, adicionou-se-lhes água destilada utilizando um

método de carga constante, de modo a manter uma lâmina de água constante, de cerca de 1 cm acima da superfície do solo. Depois de se atingir um regime estacionário, o fornecimento de água foi interrompido. Logo que se deu a infiltração de toda a água existente acima da superfície do solo, aplicou-se, uniformemente, um pulso de 100 cm³ de uma solução 0.05 M de KCl. Após a infiltração da solução aplicada, adicionou-se de novo água destilada à superfície da amostra, mantendo uma lâmina de água constante, procedendo-se ao longo do tempo à recolha sucessiva do lixiviado de cada coluna de solo e respectiva medição do volume e da concentração em cloretos. No Quadro 3 encontram-se os valores da dispersividade utilizados como input do HYDRUS-1D. Uma descrição mais completa de todo o processo pode ser encontrada em Gonçalves *et al.* (2001 e 2002).

- **Propriedades físicas e químicas do solo.** Na solução do solo determinaram-se os teores em catiões solúveis (Na⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺) e a CE. Antes do início do ensaio e no fim dos períodos de rega e de lavagem pela chuva colheram-se amostras de solo nos monólitos, a 5 profundidades (0-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm), para determinação da CE, dos teores de catiões solúveis no extracto de saturação do solo, dos catiões extraíveis, da capacidade de troca catiónica (CTC), do SAR e do ESP. Os teores de catiões solúveis foram determinados por espectrofotometria de absorção atómica. A determinação dos teores de catiões extraíveis foi efectuada pelo método da trietanolamina e cloreto de bário (TEA+BaCl₂) a pH 8.1, a

CTC pelo método de Bascomb, descritos por Mesquita & Alvim (1981).

- **Condições iniciais e aos limites.** Como condição inicial, partiu-se das médias das leituras do teor de água, efectuadas por TDR, no dia 23 de Maio de 2001 (dia 0 na simulação). Os valores medidos foram de 0.1775, 0.2140, 0.2605 e 0.2828 cm³ cm⁻³ para as profundidades de 10, 30, 50 e 70 cm, respectivamente. Como condição ao limite superior utilizaram-se as condições atmosféricas diárias e água de rega aplicada, e drenagem livre no limite inferior.

A comparação entre os valores medidos e simulados pelo HYDRUS-1D foi feita recorrendo à análise de regressão linear simples, forçada à origem, e aos coeficientes de regressão (*b*) e de determinação (*R*²). Os valores medidos da CE, concentrações de solutos na solução do solo e no solo, assim como o ESP e o SAR, referentes aos dois primeiros períodos de rega e de lavagem pela chuva, podem ser encontrados em Gonçalves *et al.* (2005).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 1 apresenta-se a evolução do teor de água médio para os 3 monólitos e para o período de tempo do ensaio (1227 dias) e respectivo desvio padrão. As medições com TDR indicaram variações no teor de água entre 0.20 e 0.35 cm³ cm⁻³, consoante a profundidade monitorizada e o período do ano, isto é, o de rega *R* (dias 1-76; 388-479; 737-820; e 1128-1186), o de precipitação/lavagem *L* (dias 134-323; 480-713; e 861-1084) ou o período intermédio sem chuva nem rega. Na Figura 1 pode-se verificar que a relação entre os valores de humidade medidos

por TDR e os valores simulados, obtida para as 4 profundidades, é bastante conseguida, resultando num coeficiente de

determinação (R^2) de 0.985 e um coeficiente de regressão (b) de 0.961, para 1180 observações (n) (Quadro 4).

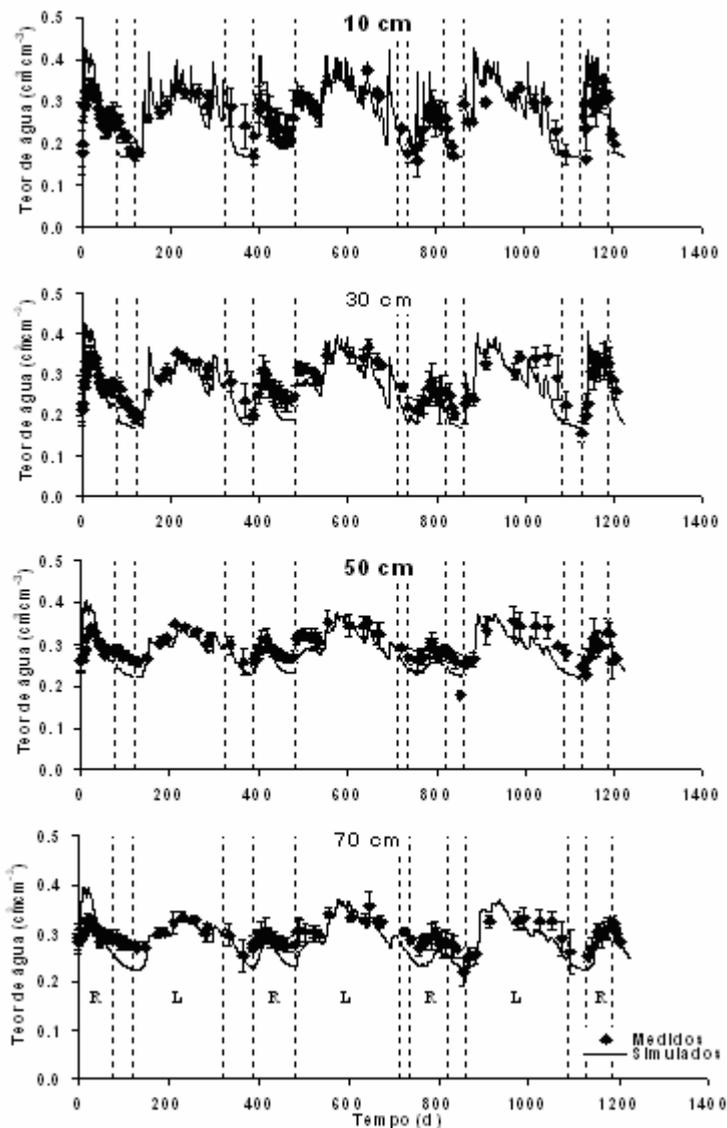


Figura 1 - Teor de água médio medido (TDR) e respectivo desvio padrão, e valores simulados (HYDRUS), nos 3 monólitos, às profundidades de 10, 30, 50 e 70 cm. *R* corresponde ao período de rega, *L* ao de lavagem. O período intermédio corresponde aos períodos sem rega nem chuva

Na Figura 2 são apresentados os resultados das medições da CE da solução do solo e correspondentes simulações obtidas com o modelo HYDRUS-1D para os 3 monólitos, para as profundidades de 10, 30, 50 e 70 cm e para as águas de rega aplicadas em 2001 e 2002 (Águas I – $A=0.3$, $B=0.8$ e $C=1.6$ dS m^{-1}) e 2003 e 2004 (Águas II – $A=0.8$, $B=1.6$ e $C=3.2$ dS m^{-1}), cujas composições iônicas se encontram no Quadro 2. O comportamento geral das medições de campo indica aumentos da CE da solução de solo durante as fases de rega (R), e reduções no Inverno devido à precipitação ocorrida e às características hidráulicas favoráveis do solo (Quadro 1) que promovem a lavagem do solo. Verificou-se assim, que as águas com CE até 1.6 dS m^{-1} não provocaram a salinização do solo, pois apesar de nos ciclos de rega a CE sofrer um aumento nas camadas superiores do solo (0-40/50 cm), nos períodos de lavagem do solo os sais acumulados são arrastados para as camadas inferiores atingindo nessas camadas (50-70 cm) uma CE de 3 dS m^{-1} . Todavia, as águas de 3.2 dS m^{-1} levaram à salinização da solução do solo, tendo-se registado valores de 12 dS m^{-1} na camada de 0-20 cm. A relação entre os valores medidos e simulados, expressa na Figura 2, resultou num $R^2=0.831$, $b=1.002$, para $n=1037$ observações (Quadro 4). É de destacar que após as regas e antes do início das chuvas outonais e durante os períodos mais secos a que o solo estava sujeito, em que não era possível extrair solução do solo, o modelo previu os maiores aumentos da CE na solução do solo. Durante esses períodos, que se podem prolongar até cerca de 2 meses, ocorrerá uma concentração dos sais no solo dado que o teor de água no solo diminuirá significativamente abaixo da capacidade de campo e a temperatura do

ar e as taxas de evaporação do solo se mantêm elevadas, pelo que as simulações para aqueles períodos são perfeitamente aceitáveis.

Os catiões solúveis do solo (Na^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+}) apresentam comportamento idêntico ao da CE, registando-se aumentos das concentrações destes iões durante os ciclos de rega e reduções devido à lavagem nos períodos de Inverno. Exemplos dos ajustamentos obtidos para os três catiões estudados podem ser observados na Figura 3. O Na^+ solúvel mostrou o melhor ajustamento entre os valores medidos e simulados para os iões solúveis, com um R^2 de 0.892, um b de 0.925, para $n=1092$ observações. O ajustamento do Ca^{2+} deu origem a um R^2 de 0.797 e um b de 0.849 para $n=1016$ observações, enquanto que o Mg^{2+} resultou num R^2 de 0.805 e um b de 0.920, para $n=1051$ observações (Quadro 4).

Os maiores valores de SAR [9 (meq L^{-1}) $^{0.5}$] foram determinados no monólito C (águas C e C') à profundidade de 10 cm, diminuindo posteriormente durante o Inverno para 5 (meq L^{-1}) $^{0.5}$. Em profundidade, e devido à lavagem das camadas superiores no Inverno, os valores de SAR aumentaram gradualmente ao longo dos anos. Os monólitos A e B apresentaram um comportamento idêntico, embora os valores observados sejam naturalmente inferiores. O ajustamento dos valores de SAR (Figura 4), calculados a partir das concentrações dos iões solúveis e dos valores de SAR resultantes da simulação do HYDRUS-1D, resultou num $R^2=0.865$ e $b=1.038$, para $n=1181$ observações de entre todos os parâmetros medidos.

Os valores de ESP (relação entre o sódio de troca e a soma dos catiões de troca) foram determinados a partir de amostras de solo colhidas no início e após os ciclos de rega, destinando-se a avaliar

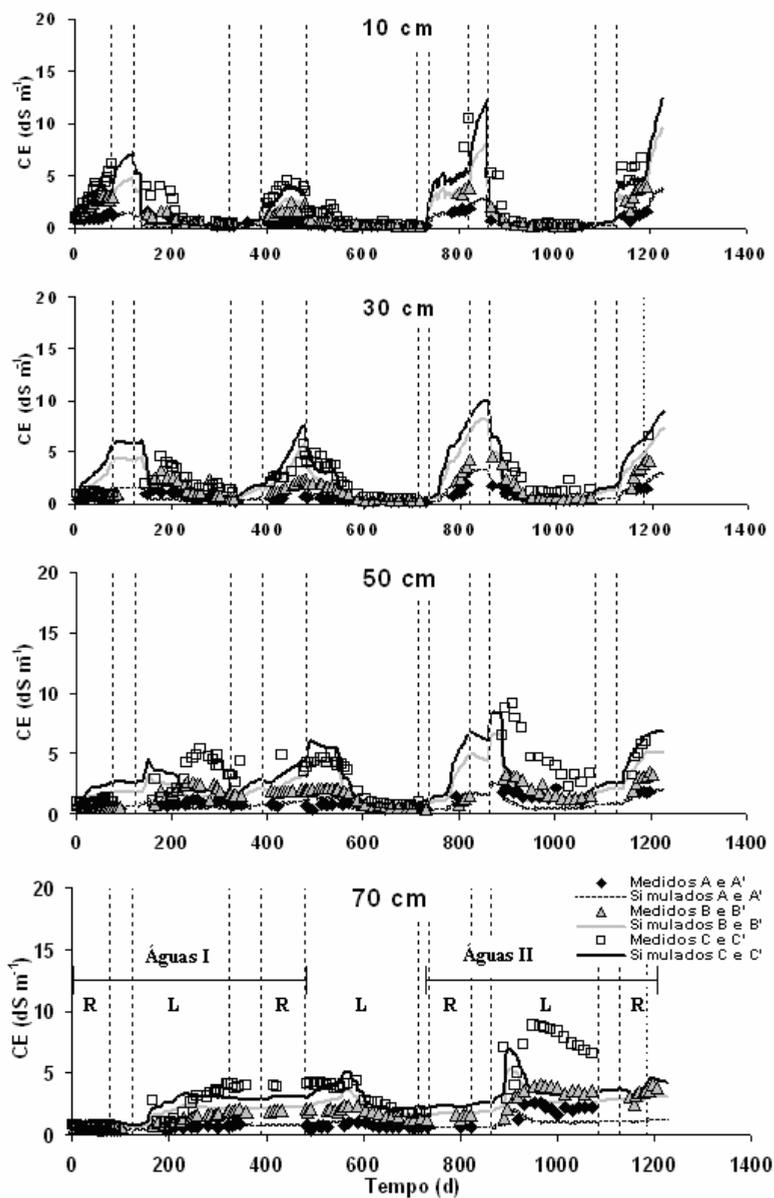


Figura 2 - Condutividade eléctrica medida e simulada, nos três monólitos, às profundidades de 10, 30, 50 e 70 cm. R corresponde ao período de rega e L ao de lavagem. O período intermédio corresponde aos períodos sem rega nem chuva

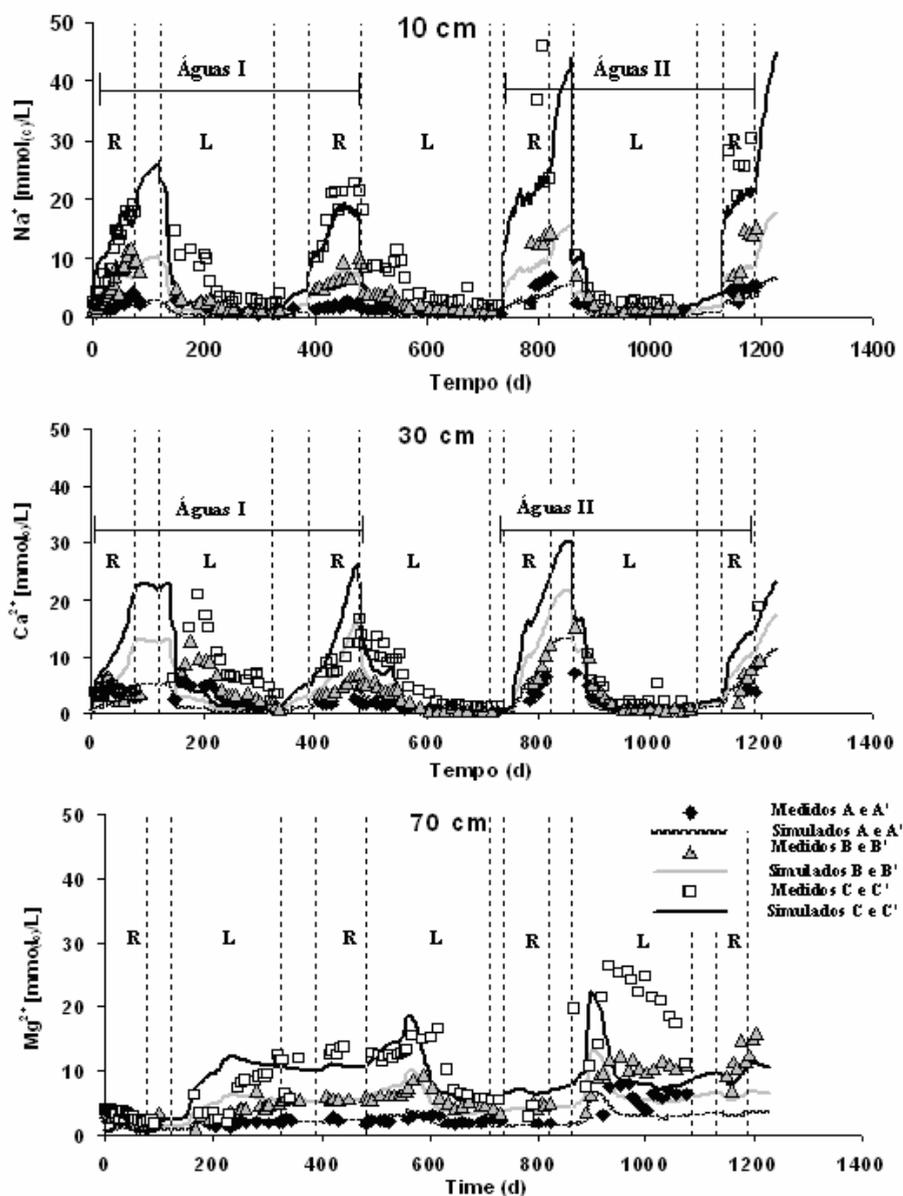


Figura 3 - Exemplos dos resultados da modelação para os teores de sódio, cálcio e magnésio solúveis, nos três monólitos. *R* corresponde ao período de rega e *L* ao de lavagem. O período intermédio corresponde aos períodos sem rega nem chuva

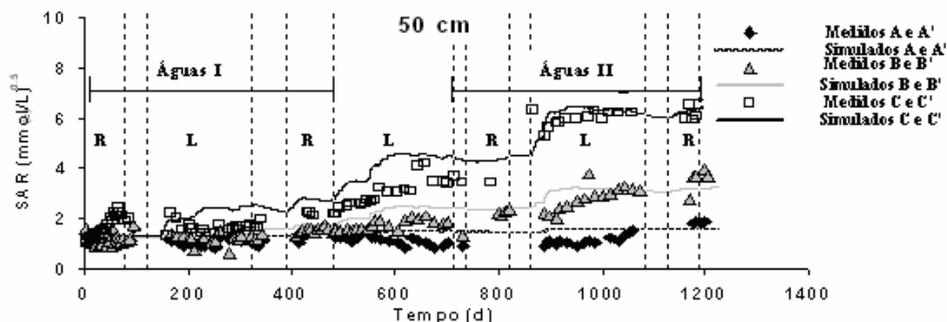


Figura 4 - Razão de adsorção de sódio calculada e simulada, nos três monólitos, às profundidades de 10, 30, 50 e 70 cm. R corresponde ao período de rega e L ao de lavagem. O período intermédio corresponde aos períodos sem rega nem chuva

o grau de sodicização do solo. Nos monólitos A e B, o ESP mais elevado foi de cerca de 7%, mas no monólito C, o ESP atingiu um valor de 17% durante o ciclo de rega de 2003, o que implica a existência de riscos de sodicização do solo, muito embora a lavagem tenha provocado uma redução daquele valor para 7%. Devendo a comparação ser feita apenas para 8 datas (Figura 5), os resultados obtidos pela simulação correspondem sensivelmente ao ESP resultante das determinações laboratoriais, com exceção de alguns valores verificados no monólito B, nomeadamente na camada de 40-60 cm, em que se verificaram discrepâncias entre valores simulados e experimentais. O R^2 , é elevado, apresentando um

valor de 0.901 e $b=0.989$, para $n=120$ observações.

No Quadro 4 é de salientar que os coeficientes de regressão obtidos para a relação entre os valores medidos e simulados com o modelo HYDRUS_1D, são sempre perto de 1 e que os coeficientes de determinação são iguais ou superiores a 0.797, altamente significativos. Na Figura 6 podem ainda observar-se 2 exemplos (caso do teor de água e do sódio solúvel) da dispersão dos valores medidos e estimados com a respectiva equação de regressão em torno da linha 1:1. Quanto mais perto os pontos estiverem da linha diagonal melhor é a equação de regressão nas suas previsões.

QUADRO 4 - Valores do coeficiente de regressão (b) e do coeficiente de determinação (R^2) das regressões entre valores simulados e observados (forçadas à origem)

Parâmetros	b	R^2	n
θ	0.961	0.985	1180
CE	1.002	0.831	1037
Na	0.925	0.892	1092
Ca	0.849	0.797	1016
Mg	0.920	0.805	1051
SAR	1.038	0.956	1038
ESP	0.989	0.901	120

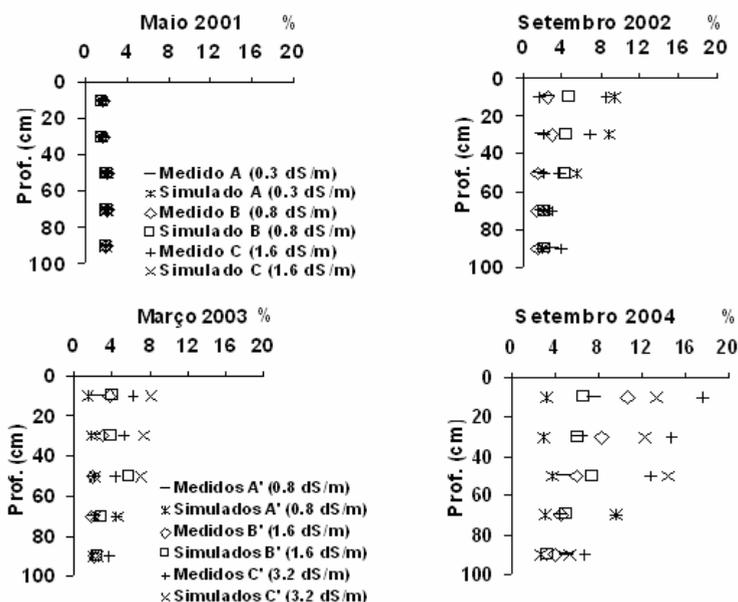


Figura 5 - Percentagem de sódio de troca medida e simulada, nos três monólitos

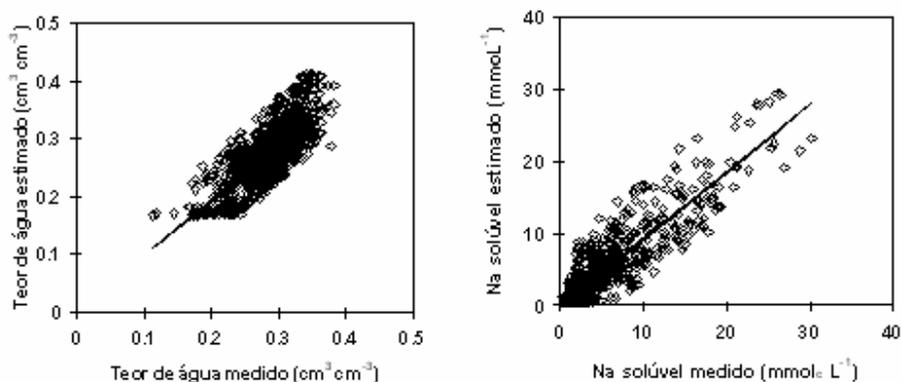


Figura 6 - Exemplos de gráficos de dispersão com a linha 1:1 dos valores medidos e estimados com a equação de regressão para o teor de água e sódio solúvel

CONCLUSÕES

O uso de águas de rega com CE até 1.6 dS m⁻¹ durante o período de Maio de 2001 a Setembro de 2004 não provocou a sali-

nização/sodicização do Aluviossоло de textura mediana estudado devido às suas características hidráulicas favoráveis e à precipitação ocorrida. Apesar de se ter verificado, durante os períodos de rega,

um aumento gradual da salinidade do solo, com uma CE máxima de 5 dS m⁻¹ nas camadas superficiais (0-40/50 cm), os valores de salinidade desta camada baixaram novamente para os observados inicialmente, em resultado da lixiviação ocorrida por acção da chuva durante os meses de Inverno.

Com a utilização da água de rega de 3.2 dS m⁻¹, verificou-se o risco de uma progressiva salinização/sodicização do solo. Após os dois ciclos de rega, de 2003 e de 2004, constatou-se o aumento da CE, nas camadas superficiais (0-20 cm), para cerca de 12 dS m⁻¹, do SAR para 8 (meq L⁻¹)^{0.5} e do ESP para 17%. Apesar das chuvas de Inverno removerem a maior parte dos sais, a lixiviação ocorrida não foi suficiente para restaurar os valores observados anteriormente à aplicação das águas.

O modelo HYDRUS-1D conseguiu prever com sucesso o teor de água no solo ao longo destes 4 anos, bem como os efeitos da água de rega na geoquímica do Aluviossolo estudado. A correspondência entre os resultados observados no campo e os simulados é notável considerando não ter existido prévia calibração dos dados e tendo em atenção que todos os dados de entrada (propriedades hidráulicas, parâmetros de transporte de solutos, dados atmosféricos, constantes de Gapon, características físicas e químicas do solo e profundidade radicular) tiveram origem em medições independentes. As regressões lineares, forçadas à origem, entre os valores medidos e simulados apresentaram coeficientes de regressão próximos de 1 e coeficientes de determinação elevados. As simulações do teor de água no solo ($R^2=0.985$), do SAR ($R^2=0.956$), do sódio solúvel ($R^2=0.892$) e ESP ($R^2=0.901$) resultaram nos coeficientes de determinação mais elevados, enquanto que os obtidos para a CE ($R^2=0.831$),

magnésio solúvel ($R^2=0.805$) e cálcio solúvel ($R^2=0.797$) foram ligeiramente inferiores.

O modelo HYDRUS-1D reúne assim condições para se tornar numa poderosa ferramenta na gestão da rega, para prever os efeitos da qualidade da água de rega no solo e nos aquíferos e na implementação de boas práticas de rega e fertilização, ajudando assim a prevenir e controlar os problemas ambientais que possam surgir no regadio. O HYDRUS-1D, bem como outros modelos semelhantes, tem ainda a grande vantagem de poder extrapolar, embora com reservas, informação recolhida num número limitado de experiências como a descrita, para diferentes tipos de solo, culturas e condições climatéricas, desde que se tenha uma base de dados que inclua os parâmetros de entrada necessários.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado no âmbito dos projectos PIDDAC 150 e AGRO 727.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes D. & Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements. *Irrigation and drainage*, paper 56, FAO, Rome, Italy.
- Galvão, P., Chambel Leitão, P., Neves, R. & Leitão, P.C. 2004. A different approach to the modified Picard method for water flow in variably saturated media. In Miller, C.T., Farthing, M.W., Gray, W.G. & Pinder, G.F. (eds) *Computational Methods in Water Resources Part 1*, 55. *Proceedings of the 15th International Conference on Computational*

- Methods in Water Resources (CMWR XV)*, June 13-17, 2004 Chapel Hill, NC, USA.
- Gonçalves, M.C., Leij, F.J. & Schaap, M.G. 2001. Pedotransfer functions for solute transport parameters of Portuguese soils. *European Journal of Soil Science*, **52**: 563-574.
- Gonçalves, M.C., Martins, J.C. & Gonçalves, A.R. 2002. Avaliação dos parâmetros de transporte de solutos no solo. *Rev. das Ciências Agrárias*, **XXV (3 e 4)**: 227-239.
- Gonçalves, M.C., Martins, J.C., Oliveira, A., Pires, F.P., Gonçalves, A.R., Bica, J. & Bica, M. 2004. Estudo preliminar sobre a evolução da salinização e da sodicização de um Aluviossolo regado com águas de diferentes qualidades, em Alvalade-Sado (Alentejo). *Rev. de Ciências Agrárias*, **XXVI (1)**: 113-126.
- Gonçalves, M.C., Martins, J.C., Neves, M.J., Pires, F.P., Oliveira, A.V., Bica, J. & Bica, M. 2005. Impacto da qualidade da água de rega no solo. Estudos da salinização e da sodicização de um Aluviossolo, em Alvalade do Sado, Alentejo. *Rev. de Ciências Agrárias*, **XXVIII (2)**: 177-188.
- Gonçalves, M.C., Pereira, L.S. & Leij, F.J., 1997. Pedo-transfer functions for estimating unsaturated hydraulic properties of Portuguese soils. *European Journal of Soil Science*, **48**:387-400.
- Mesquita, M.E. & Alvim, A. 1981. Testagem de um método de determinação da capacidade de troca catiónica em solos salinos. *Pedologia*, **16 (1)**: 165-176.
- Richards, L.A. 1954. *Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils*. USDA Handbook **60**, Washington, USA.
- Ritchie, J.T. 1972. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resources Research*, **8(5)**: 1204-1213.
- Šimůnek, J., Suarez, D.L. & Šejna, M. 1996. The UNSATCHEM software package for simulating one-dimensional variably saturated water flow, heat transport, carbon dioxide production and transport, and multicomponent solute transport with major ion equilibrium and kinetic chemistry, Version 2.0, *Research Report No. 141*, U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, California, 186pp.
- Šimůnek, J. & Valocchi, A.J. 2002. Geochemical Transport. In Dane, J.H. & Topp, G.C. (eds) *Methods of Soil Analysis, Part 1, Physical Methods*, Chapter 6.9, Third edition, pp. 1511-1536, SSSA, Madison, WI.
- Šimůnek, J., van Genuchten, M.Th. & Šejna, M. 2005. The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. Version 3.0, *HYDRUS Software Series 1*. Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, Riverside, CA, 270pp.
- Toride, N., Leij, F.J. & van Genuchten, M. Th. (1995). *The CXTFIT Code for Estimating Transport Parameters from Laboratory or Field Tracer Experiments, Version 2.0*. Research Report 137, US Salinity Laboratory, Riverside, CA.
- Van Genuchten, M.Th. 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **44**: 892-898.
- Van Genuchten, M.Th. & Šimůnek, J. 2004. Integrated modeling of vadose zone flow and transport processes. In Feddes, R.A. Rooij, G.H. & van Dam, J.C.. Wageningen (ed) *Proc. Unsaturated*

Zone Modelling: Progress, Challenges and Applications, 3-5, pp. 37-69. The Netherlands, October.

Wagenet, R.J. & Hutson, J.L. 1987. *LEACHM: Leaching Estimation and Chemistry Model, A Process-based*

Model of Water and solute Movement, Transformations, Plant Uptake and Chemical Reactions in the Unsaturated Zone. Continuum 2. Water Resour. Inst., Cornell University, Ithaca, New York.