

BALANÇO DE SAIS EM MONÓLITOS DE SOLO APÓS 4 CICLOS DE REGA COM ÁGUAS DE DIFERENTE QUALIDADE

Gonçalves, M. C.; Martins, J. C.; Neves, M. J.; Pires F. P.; Ramos, T. B.; Vilar, M. T. & Bica, J.

Estação Agronómica Nacional, Quinta do Marquês, 2784-505 Oeiras, E-mail: mc.goncalves@netc.pt

Resumo

Avaliaram-se os riscos de salinização e de sodização de um Aluviossolo decorrentes da aplicação de águas de rega de diferente qualidade (0.3 a 3.2 dS m^{-1}), em 3 monólitos de solo, designados por A, B e C, construídos no campo em Alvalade-Sado, com $1.2 \text{ m}^2 \times 1 \text{ m}$, drenagem livre e sujeitos às condições atmosféricas. O ensaio foi conduzido de 2001 a 2005, e contemplou 4 ciclos de rega (Maio a Agosto), com uma dotação total anual média de 500 mm , e os respectivos períodos de lavagem pela água da chuva. As águas de rega aplicadas foram "fabricadas", a partir da água da albufeira de Campilhas, com concentrações crescentes de cloreto de sódio, de cálcio e de magnésio. Nos dois primeiros ciclos de rega, as águas, apresentavam condutividades eléctricas (CE) de 0.3 (água de Campilhas), 0.8 e 1.6 dS m^{-1} , valores de SAR de 1 , 3 e $6 (\text{meq L}^{-1})^{0.5}$ e uma relação $\text{Ca:Mg} = 1:2$. Nos dois últimos ciclos de rega agravou-se a qualidade da água para valores de CE de 0.8 , 1.6 e 3.2 dS m^{-1} e valores de SAR de 1.5 , 3 e $6 (\text{meq L}^{-1})^{0.5}$.

Nos 3 monólitos monitorizou-se a solução do solo a 4 profundidades (10 , 30 , 50 e 70 cm), $2 \times$ por semana, de Maio a Agosto (período de rega), e 1 a $2 \times$ por mês nos restantes meses do ano. Na solução do solo determinaram-se os teores em catiões solúveis (Na^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+}) e a CE . No fim dos ciclos de rega e de "lavagem" pela chuva colheram-se amostras de solo em 5 espessuras até à profundidade de 100 cm para determinação da CE e dos teores de catiões solúveis no extracto de saturação do solo, dos teores de catiões extraíveis, da capacidade de troca catiónica (CTC), da razão de adsorção de sódio (SAR) e da percentagem de sódio de troca (ESP). Os ensaios terminaram em Dezembro de 2005, tendo os monólitos sido amostrados por camada de solo para comparação com os valores iniciais. Compararam-se as propriedades hidráulicas e os teores em catiões e efectuou-se um balanço de sais.

No final do ensaio os valores da CE , medida no extracto de saturação do solo, não ultrapassaram 1 e 2 dS m^{-1} , para as profundidades de $0-40$ e de $40-100 \text{ cm}$, respectivamente. O comportamento da CE da solução do solo acompanha a evolução da do extracto de saturação do solo até ao final do último ciclo de rega. A precipitação ocorrida ao longo do ensaio foi suficiente para proporcionar a lavagem dos sais, mais eficientemente contudo até à profundidade dos 40 cm . O SAR foi aumentando com as regas, mais notoriamente até aos 40 cm , não sendo tão evidente como no caso da CE o efeito de lavagem pela chuva. No final do ensaio foram atingidos, na camada superficial, valores de SAR e de ESP , respectivamente de 3 , 4 e 7 e de 4 , 4 e 6 (monólitos A, B e C). Estes valores, embora ainda não sejam de molde a provocar riscos de sodicização do solo, representam, em relação aos valores iniciais, respectivamente um aumento de 4 , 5 e 9 vezes para o SAR e de 4 , 4 e 6 vezes no caso do ESP .

Foi ainda conseguido um bom ajustamento entre os valores de *SAR* e de *ESP* ($R^2=0.815$, $n=124$), facto que permite evitar a determinação analítica do sódio de troca e da *CTC*. O balanço dos sais indicou uma acumulação de sódio de cerca de 2.5 e 4 vezes, o seu valor inicial, nos monólitos B e C. Verificou-se ainda uma lixiviação importante daquele catião no monólito C. O balanço do Mg^{2+} e do Ca^{2+} é semelhante ao do Na^+ embora as quantidades acumuladas e lixiviadas sejam menores e concordantes com as aplicações daqueles catiões através da água de rega. Não se verificaram alterações dignas de nota nas propriedades hidráulicas do solo ao longo dos ensaios.

Palavras chave: salinização, sodização, *SAR*, *ESP*, propriedades hidráulicas.

Abstract

The aim of this study is to evaluate salinisation and sodization hazards of a Eutric Fluvisol irrigated with different quality waters (between 0.3 and 3.2 dS m⁻¹). The experiments, from 2001 to 2005, included the monitoring of three soil monoliths, named A, B, and C, built in the field in Alvalade-Sado, with 1.2 m² × 1 m, having free drainage, and exposed to atmospheric conditions. The monoliths were subjected to 4 irrigation cycles (May to August), with a total water application of 500 mm/year, and the respective rainfall leaching cycles, during the rest of the year. Irrigation waters, also called A, B and C, which were applied to the soil monoliths with the same references, were artificially made from the Campilhas reservoir water by increasing concentrations of NaCl, MgCl₂, and CaCl₂. In the two first irrigation cycles the irrigation waters had electrical conductivities (*EC*) of 0.3 (water of the reservoir), 0.8 and 1.6 dS m⁻¹, *SAR* values of 1, 3 and 6 (meq L⁻¹)^{0.5} and a relation Ca:Mg=1:2. In the last two cycles, the quality of A, B and C irrigation waters decreased to values of *EC* of 0.8, 1.6 and 3.2 dS m⁻¹ and *SAR* values of 1.5, 3 and 6 (meq L⁻¹)^{0.5}.

At the end of the irrigation periods and after the rainfall leaching cycles, soil samples were collected at 5 depths, until 100 cm depth, to measure *EC* and the ionic composition of the soil saturation extract, the extractable cations, and the cation-exchange capacity (*CTC*). The sodium adsorption rate (*SAR*), and the exchangeable sodium percentage (*ESP*) were calculated. The experiments finished at the beginning of December 2005, being the monoliths sampled by soil layer (disturbed and undisturbed samples). These samples were analysed and compared with the initial values in May 2001. The hydraulic properties and the chemical properties were compared, and a salt balance was made.

At the end of the experiments, *EC* saturation extract values, were higher than the initial ones but didn't exceed 1 and 2 dS m⁻¹, respectively at 0-40 and at 40-100 cm depth. A similar behaviour occurred with *EC* soil solution values. The rainfall cycles were enough to leach the salts, more efficiently until the 40 cm depth. On the other hand, *SAR* and *ESP* values increased with irrigation, notably until 40 cm depth, not being so evident the leaching effect. At December 2005, *SAR* and *ESP* values, respectively, of 3, 4 and 7 and 4, 4 and 6 (A, B and C monoliths) were reached at the top layer. Although, those values were not high enough to promote soil sodization, represent an increase of 4, 5 and 9 times (*SAR*) and 4, 4 and 6 times (*ESP*) relatively to the initial ones.

A relationship between SAR and ESP was established ($R^2=0.815$, $n=124$), in order to avoid the time consuming analytical determinations of exchangeable Na and CTC.

Salt balance showed a sodium accumulation of about 2.5 and 4 times the initial values, in B and C monoliths. An important leaching was also verified in C monolith. Mg^{2+} and Ca^{2+} balances are similar to the one of Na^+ , although the accumulated and leached quantities were smaller, according to the respective quantities in the irrigation waters.

Soil hydraulic properties showed a similar behaviour at the beginning and end of the experiments. The small variations verified are certainly due to the spatial variation.

Introdução

O problema da má qualidade da água de rega torna-se particularmente importante quando é aplicada a solos de cinética lenta, como é o caso dos solos de texturas finas e médias existentes no Alentejo, e em zonas com valores baixos do superavit hídrico anual, que também é o caso daquela região. A conjugação destes factores associada ainda à carência ou insuficiência de drenagem na maior parte dos aproveitamentos hidro-agrícolas implantados a Sul do Tejo mostra que os riscos de salinização não foram contemplados no planeamento daquelas instalações de regadio (Alvim, 1980; Alvim & Nunes, 1984). De acordo com o Estudo Integrado de Impacte Ambiental de Alqueva, a má qualidade da água de rega poderá provocar problemas graves na qualidade do solo do futuro perímetro de rega (Sequeira *et al.*, 1995).

Em geral, a salinização ocorre quando a presença de sais modifica a estrutura química do solo. O solo e a sua solução vão alterando a sua composição química em função da concentração e constituição da água de rega devido quer à variação em concentração que sofrem, quer às reacções químicas que se verificam entre eles (Gonçalves *et al.*, 2004). A avaliação do risco de sodização do solo deve ter em consideração vários aspectos relacionados com o solo como sejam a textura, a mineralogia da argila, a razão de adsorção de sódio (SAR), a percentagem de sódio de troca (ESP), a capacidade de troca catiónica (CTC) e a concentração electrolítica da solução do solo, e ainda dos parâmetros relativos à qualidade da água de rega. A acumulação no solo de catiões dispersivos, tais como o sódio e por vezes também o magnésio e o potássio, promove a expansão e/ou a dispersão da argila alterando a geometria dos poros do solo o que afecta a sua permeabilidade, a retenção de água e a produtividade das culturas (Keren, 2000).

Neste trabalho apresentam-se as conclusões dos estudos efectuados durante 5 anos (2001-2005), e já parcialmente descritos por Gonçalves *et al.* (2004, 2005), tendo como objectivo a avaliação dos riscos de salinização e de sodização de um Aluviossolo de textura mediana, resultantes da utilização de águas de rega de qualidade variável.

Material e métodos

Utilizaram-se os monólitos de solo descritos em Gonçalves *et al.* (2004, 2005), situados no Posto de Culturas Regadas em Alvalade-Sado. O solo em estudo é um Aluviossolo Moderno Não Calcário de textura mediana, cujas propriedades físicas e químicas se

encontram no Quadro 1 (condição inicial do solo). As propriedades hidráulicas do solo foram medidas laboratorialmente no início e no fim dos ensaios (Maio 2001 e Dezembro de 2005), para as 3 camadas identificadas no perfil daquele solo. Para a determinação da curva característica de humidade do solo utilizaram-se métodos de caixas de sucção, da placa de pressão e da evaporação. Para determinação da curva de condutividade hidráulica utilizaram-se os métodos da crosta, do ar quente e da evaporação. A condutividade hidráulica saturada foi medida com o método da carga constante. Estas metodologias encontram-se descritas em Gonçalves *et al.* (2000).

Quadro 1 – Propriedades físicas e químicas do Aluviossolo estudado (solo inicial)

	Profundidade (cm)		
	0-48	48-85	85-170
Areia grossa, g kg ⁻¹	62	51	61
Areia fina, g kg ⁻¹	532	468	428
Limo, g kg ⁻¹	296	292	282
Argila, g kg ⁻¹	110	189	229
Textura	Franco-limosa	Franco-limosa	Franca
Densidade aparente, g cm ⁻³	1.49	1.51	1.61
EC, dS m ⁻¹	0.20	0.23	0.23
pH (H ₂ O)	5.94	6.58	6.74
Catiões solúveis, cmol _c kg ⁻¹			
Na ⁺	0.025	0.033	0.036
Mg ²⁺	0.025	0.019	0.019
Ca ²⁺	0.031	0.022	0.024
Catiões extraíveis, cmol _c kg ⁻¹			
Na ⁺	0.145	0.216	0.217
Mg ²⁺	2.188	2.700	2.813
Ca ²⁺	4.663	5.850	6.200
CTC, cmol _c kg ⁻¹	12.00	13.12	13.28
SAR, (mmol _c L ⁻¹) ^{0.5}	0.756	1.260	1.296
ESP, %	1.00	1.39	1.36

Os monólitos foram regados manualmente (aplicações de 20 mm), de modo a manter um teor de água no solo entre 25 e 35%, próximo do valor correspondente à capacidade de campo, ou mesmo um pouco acima, a fim de possibilitar a extracção da solução do solo. A composição iónica das águas de rega aplicadas encontra-se no Quadro 2. As águas de rega designadas por I aplicaram-se nos dois primeiros ciclos de rega e as designadas por II nos dois últimos. Após os períodos de rega (Maio/Junho a Agosto/Setembro) os monólitos foram sujeitos à lavagem pela chuva no período de Setembro a Março/Abril do ano seguinte (até à data em que se procedeu à amostragem do solo). A quantidade de água aplicada em cada rega e a precipitação ocorrida até às datas de amostragem, encontram-se no Quadro 3.

Quadro 2 – Composição iónica das águas de rega aplicadas aos monólitos

Monólito		<i>EC</i> dS m ⁻¹	<i>SAR</i> (mmol _c L ⁻¹) ^{0.5}	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺
				mmol _c L ⁻¹		
Águas I	A	0.3	1.0	1.00	1.00	1.00
	B	0.8	3.0	1.28	2.56	4.16
	C	1.6	6.0	1.93	3.86	10.21
Águas II	A	0.8	1.5	1.85	3.65	2.50
	B	1.6	3.0	3.16	6.32	6.52
	C	3.2	6.0	5.10	10.20	16.70

Quadro 3 – Quantidade de água aplicada nas regas, precipitação ocorrida e duração dos ciclos de rega e de lavagem pela chuva.

Ano	Total	Rega (mm)		Precipitação ocorrida (mm)		
		Início	Fim	Total	Início	Amostragem
2001	500	Maio	Agosto	440	Setembro 01	Maio 02
2002	504	Junho	Setembro	570	Setembro 02	Março 03
2003	456	Maio	Agosto	388	Setembro 03	Março 04
2004	504	Junho	Agosto	180	Setembro 04	Abril 05
2005	-	-	-	250	Maio 05	Dezembro 05

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 e da razão de adsorção de sódio (*SAR*) no extracto de saturação do solo, dos teores de catiões extraíveis e de troca, da capacidade de troca catiónica (*CTC*) e da percentagem de sódio de troca (*ESP*). É de referir que as amostragens iniciais e finais foram efectuadas por camada/horizonte de solo, e não geometricamente de 20 em 20 cm como as efectuadas no fim dos ciclos de rega e de lavagem pela chuva.

A solução do solo foi recolhida através de cápsulas porosas a 4 profundidades (10, 30, 50 e 70 cm), em regra duas vezes por semana, durante a rega e 1 a 2 vezes por mês no restante período (duas repetições a cada profundidade). Na solução do solo determinaram-se os teores em catiões solúveis (Na⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺) e a *CE*. As observações terminam no fim do 4º e último ciclo de rega (Set. 2004), pois a partir daqui não nos foi possível recolher os lixiviados devido à escassa precipitação ocorrida (180 mm) entre Setembro de 2004 e Abril de 2005 (v. Quadro 3).

Neste trabalho utilizou-se a condutividade eléctrica do extracto de saturação do solo (*CE*) como indicador da salinidade do solo e os parâmetros *ESP* e *SAR* para caracterizar a sodicidade do solo.

O *SAR* e o *ESP* são definidos por:

$$SAR = \frac{Na^+ \text{ solúvel}}{\sqrt{\frac{(Ca^{2+} \text{ solúvel} + Mg^{2+} \text{ solúvel})}{2}}}, \quad (1)$$

onde Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} são as concentrações dos cátions solúveis do extracto de saturação, expressas em $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$, e:

$$ESP = \frac{\text{Na}^+ \text{troca}}{CTC} \times 100 \quad (2)$$

em que Na^+ é a quantidade de sódio adsorvido ($\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ de solo) e CTC a capacidade de troca catiónica ($\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ de solo).

Efectuou-se um balanço de massa dos cátions extraíveis, Na^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} , até 1 m de profundidade, nos 3 monólitos. Em cada monólito, a massa total acumulada de cada catião resultou da diferença entre a sua massa total final, medida em Dezembro de 2005, e a sua massa total inicial medida em Maio de 2001. A quantidade lixiviada de cada catião foi obtida por diferença entre a massa total acumulada e a massa total aplicada na rega. As massas totais iniciais e finais de cada catião, até 1 m de profundidade, foram calculadas pelo somatório do produto da concentração média medida em cada camada pelo respectivo volume.

Resultados e discussão

Nos Quadros 4, 5 e 6 apresentam-se os resultados da evolução da CE medida no extracto de saturação do solo, do SAR e do ESP , respectivamente, ao longo dos 5 anos do ensaio. Os resultados correspondem às amostras colhidas em 5 espessuras do solo após os ciclos de rega e de lavagem pela chuva. Como já foi referido, neste trabalho utilizou-se a CE como indicador da salinidade e os parâmetros ESP e SAR para caracterizar a sodicidade do solo.

Os resultados indicados no Quadro 4 mostram, como seria de esperar, um aumento pronunciado da salinidade nas camadas superficiais do solo após as regas, atingindo-se máximos, nomeadamente em Setembro de 2003 e de 2004 e em Abril de 2005, de cerca de 1.5, 4 e 6 dS m^{-1} nos monólitos A, B e C, respectivamente. Segundo Martins *et al.* (2001), no solo regado com a água 0.8 e 1.6 dS m^{-1} (monólito B), a CE do solo situa-se na classe de 2-4 dS m^{-1} , em que as culturas muito sensíveis podem ser afectadas nos seus rendimentos. No solo regado com água C, segundo os mesmos autores, a CE do solo situa-se na classe de 4-8 dS m^{-1} , em que é ainda possível o cultivo de muitas espécies, mas semi-tolerantes à salinidade.

Com os períodos chuvosos verificou-se uma lavagem até cerca dos 40 cm, e uma acumulação de sais nas camadas inferiores até cerca de 80 cm, com valores máximos no perfil de cerca de 1.5, 2.5 e 3 dS m^{-1} . No final do ensaio (Dezembro 2005), os valores da CE revelam, em relação ao valor inicial do solo, um aumento médio de 2, 4.5 e 3 vezes para a profundidade de 0 a 40 cm, de 3.5, 10 e 8 vezes de 40 a 80 cm e de 3, 4.5 e 9 vezes de 80 aos 100 cm de profundidade, para os monólitos A, B e C, respectivamente. É de salientar que os valores da CE mais elevados verificados em Dezembro de 2005 praticamente não ultrapassam os 2 dS m^{-1} nas camadas de 40-100 cm, mesmo nos monólitos B e C. Nas camadas superficiais do solo (até 40 cm), embora tenha havido um ligeiro acréscimo relativamente ao valor inicial (2001), a CE não ultrapassou 0.7 dS m^{-1} no monólito C, regado com água de pior qualidade. Importa ainda relevar o facto de

os valores da CE nos 3 monólitos, em Abril de 2005, não terem descido acentuadamente em relação a Setembro de 2004, tal como tinha acontecido em Março de 2004 relativamente a Setembro de 2003. Este facto deveu-se a que no período Outono-Invernal de 2004/2005 choveram apenas 180 mm (ano extremamente seco) de que resultou portanto uma lavagem de sais deficiente.

Quadro 4 - Evolução da CE (dS m⁻¹) do solo nos 3 monólitos, de Maio de 2001 a Dezembro de 2005

Monólito e Prof. (cm)	Mai 01	Set 01	Mai 02	Set 02	Mar 03	Set 03	Mar 04	Set 04	Abr 05	Dez 05
A 0-20	0.20	0.81	0.23	0.42	0.29	1.31	0.33	1.50	0.62	0.43
A 20-40	0.20	0.25	0.22	0.39	0.14	0.60	0.37	0.81	1.05	0.43
A 40-60	0.23	0.17	0.23	0.25	0.20	0.40	0.49	0.91	1.47	0.81
A 60-80	0.23	0.19	0.25	0.21	0.27	0.35	0.68	0.84	1.10	0.81
A 80-100	0.23	0.20	0.27	0.10	0.30	0.29	0.78	0.90	0.65	0.63
B 0-20	0.20	1.33	0.28	0.92	0.28	3.80	0.29	3.47	2.52	0.90
B 20-40	0.20	0.56	0.33	0.91	0.31	1.69	0.35	1.54	1.80	0.90
B 40-60	0.23	0.44	0.59	0.76	0.41	0.95	0.81	1.77	1.79	2.21
B 60-80	0.23	0.32	0.54	0.69	0.56	0.87	1.20	1.63	1.52	2.21
B 80-100	0.23	0.34	0.47	0.57	0.60	0.77	1.16	1.55	1.25	1.04
C 0-20	0.20	2.65	0.31	0.87	0.35	5.41	0.39	5.85	5.79	0.70
C 20-40	0.20	1.02	0.31	1.24	0.23	3.40	0.63	3.24	3.22	0.70
C 40-60	0.23	0.46	0.61	1.28	0.35	2.37	1.69	3.07	3.56	1.86
C 60-80	0.23	0.33	0.85	1.25	0.39	1.70	2.35	3.22	3.12	1.86
C 80-100	0.23	0.24	0.81	1.14	0.48	1.34	2.51	2.87	2.51	2.12

Na análise destes resultados, deve ter-se em conta que este solo apresenta características hidráulicas favoráveis, com uma condutividade hidráulica saturada de cerca de 20 cm/dia nos primeiros 40 cm e cerca de 4× superior na camada subjacente (Gonçalves *et al.*, 2004), o que facilita o processo de lavagem dos sais. Martins *et al.* (2001) nos seus estudos em colunas de solos, encontraram situações mais problemáticas pois estudaram solos de cinética mais lenta.

No Quadro 5 apresenta-se a evolução do SAR do extracto de saturação do solo. A relação entre o Na solúvel e o Na adsorvido não depende apenas das concentrações do sódio dissolvido na solução, mas também das concentrações de cálcio e magnésio presentes. Os valores do SAR foram aumentando com as regas, mais notoriamente até aos 40 cm, não sendo tão evidente como no caso da CE o efeito da lavagem pela chuva. No final do ensaio o SAR atingiu, na camada superficial, valores de 3, 4 e 7 (monólitos A, B e C, respectivamente) que representam um aumento de 4, 5 e 9 vezes em relação aos valores iniciais.

Quadro 5 - Evolução do SAR do solo nos 3 monólitos, de Maio de 2001 a Dezembro de 2005

Prof. (cm)	Mai 01	Set 01	Mai 02	Set 02	Mar 03	Set 03	Mar 04	Set 04	Abr 05	Dez 05
A 0-20	0.76	0.87	1.05	1.65	1.66	2.04	2.63	3.03	3.19	3.16
A 20-40	0.76	1.00	1.39	1.19	1.22	1.70	2.34	2.50	2.70	3.16
A 40-60	1.26	1.14	1.26	1.38	1.43	1.88	1.74	1.83	2.02	1.78
A 60-80	1.26	1.24	1.22	1.53	1.60	1.54	1.53	1.56	1.55	1.78
A 80-100	1.30	1.86	2.03	2.33	2.58	1.94	1.86	2.01	2.02	3.20
B 0-20	0.76	1.73	2.36	3.56	2.99	3.69	2.94	4.15	4.87	4.05
B 20-40	0.76	1.30	1.82	2.54	2.79	2.49	3.86	3.74	4.13	4.05
B 40-60	1.26	1.05	1.29	1.61	2.21	2.13	3.06	3.11	3.30	2.31

B 60-80	1.26	1.29	1.75	1.50	1.87	1.56	2.10	2.22	2.33	2.31
B 80-100	1.30	2.13	2.23	2.11	1.80	1.58	1.65	1.56	1.82	1.89
C 0-20	0.76	3.87	3.34	5.98	3.81	6.78	5.04	7.04	7.98	7.04
C 20-40	0.76	1.98	2.36	4.49	3.62	5.15	6.81	6.66	7.42	7.04
C 40-60	1.26	1.26	1.54	2.19	3.71	4.06	5.71	5.72	6.01	5.01
C 60-80	1.26	1.60	1.47	1.58	2.56	2.72	3.91	3.92	3.41	5.01
C 80-100	1.30	1.72	2.53	1.90	2.13	2.10	2.71	2.91	2.19	2.65

No Quadro 6 pode observar-se a evolução do *ESP*, a diferentes profundidades, no fim dos ciclos de rega e dos ciclos de lavagem pela água da chuva. Os valores do *ESP* também aumentaram nas camadas superficiais devido à rega, tendo atingido valores máximos, na camada de 0-20 cm, de cerca de 4 e 5% nos monólitos A e B, e de 8 % no monólito regado com as águas mais salinas (1.6 e 3.2 dS m⁻¹). A lavagem pela chuva originou reduções moderadas naquele parâmetro, tendo no caso do monólito C sido reduzido para 6% nas camadas superficiais (0-40 cm), e de 5 % nas camadas de 40 a 80 cm. Essas mesmas camadas do monólito C (condições mais desfavoráveis) apresentavam ainda valores de *SAR* de cerca de 7 e 5 (meq L⁻¹)^{0.5}, respectivamente, embora a *CE* fosse baixa na camada superficial (0.70 dS m⁻¹) e não tivesse ultrapassado valores de cerca de 2 dS m⁻¹ nas camadas mais profundas. Os valores finais de *ESP*, embora bastante superiores aos valores iniciais, não são de molde a provocarem riscos imediatos de sodização do solo, já que só para valores de *ESP* superiores a 15% é em regra provável a ocorrência daquele fenómeno. Contudo, em certos solos de textura fina, um *ESP*=10% pode já originar problemas de desfloculação de argilas e portanto de estabilidade de estrutura (Greene *et al.* 1978).

Quadro 6 - Evolução do *ESP* do solo nos 3 monólitos, de Maio de 2001 a Dezembro de 2005

Prof. (cm)	Mai 01	Set 01	Mai 02	Set 02	Mar 03	Set 03	Mar 04	Set 04	Abr 05	Dez 05
A 0-20	1.00	0.76	0.84	1.19	1.14	1.94	1.48	4.10	2.71	4.02
A 20-40	1.00	0.97	0.75	0.97	0.99	1.17	1.58	3.19	2.83	4.02
A 40-60	1.38	1.17	0.93	1.14	1.12	1.11	1.15	2.69	1.48	3.22
A 60-80	1.38	1.65	0.86	1.20	1.18	1.56	1.18	2.64	2.25	3.22
A 80-100	1.39	2.23	1.45	1.87	2.06	1.90	1.42	2.67	1.75	2.86
B 0-20	1.00	2.73	1.80	1.35	1.79	3.16	2.16	4.49	3.24	3.55
B 20-40	1.00	2.78	1.74	2.16	1.93	2.67	3.11	5.20	2.63	3.55
B 40-60	1.38	1.42	1.52	1.39	1.39	2.03	2.19	5.56	1.27	3.12
B 60-80	1.38	1.51	1.21	1.18	1.12	1.77	1.69	4.98	1.88	3.12
B 80-100	1.39	2.52	1.92	1.20	1.25	1.75	1.53	3.72	1.19	2.81
C 0-20	1.00	3.20	2.26	4.62	2.15	8.09	3.34	6.32	6.66	6.28
C 20-40	1.00	2.64	1.87	2.90	2.32	7.01	5.33	7.65	5.22	6.28
C 40-60	1.38	1.35	1.23	1.68	1.96	3.09	4.62	6.81	4.15	5.26
C 60-80	1.38	1.14	1.15	1.54	1.79	1.97	3.84	6.50	2.95	5.26
C 80-100	1.39	2.56	1.46	2.00	1.80	1.69	2.68	3.15	1.35	2.65

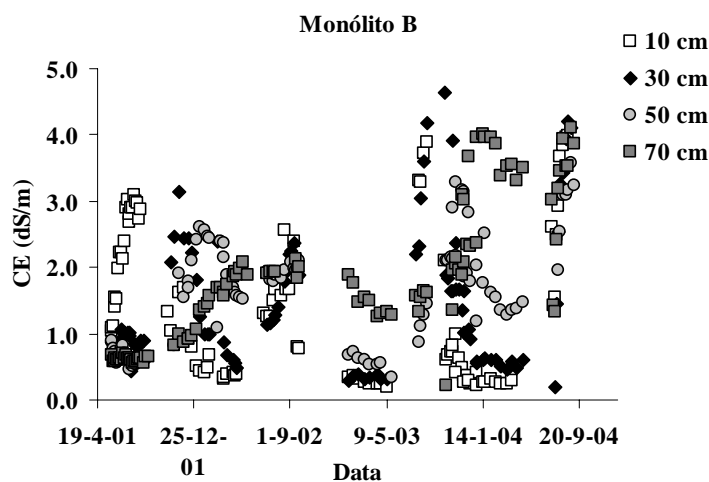
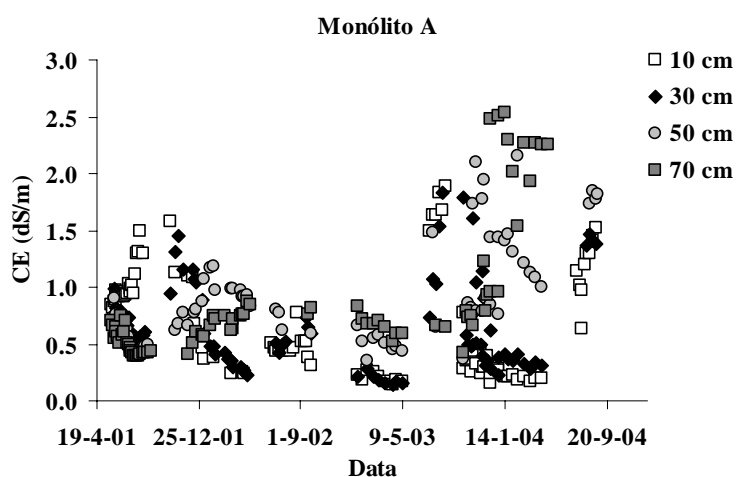
Verificou-se, neste trabalho, haver uma relação entre o *ESP* e o *SAR*, dada pela equação de regressão:

$$ESP = 0.8821 \times SAR + 0.059 \quad (R^2 = 0.815, n = 124 \text{ observações}) \quad (3)$$

Esta equação pode dispensar a determinação analítica do *ESP*, que é consideravelmente mais trabalhosa que a do *SAR*.

Na Figura 1 pode observar-se a evolução da *CE* da solução do solo recolhida através das cápsulas porosas (cápsulas porosas colocadas a meio de cada camada) ao longo do ensaio, nos 3 monólitos de solo. Como já foi referido, as observações terminam no fim do 4º e último ciclo de rega (Set. 2004), pois a partir daqui não nos foi possível recolher os lixiviados devido à escassa precipitação ocorrida (v. Quadro 3).

No fim dos períodos de rega, verificaram-se aumentos da *CE* em relação ao início do ensaio, em todas as profundidades, tendo-se atingido valores máximos de cerca de 2, 4 e 10 dS m⁻¹ na camada superficial (0-20 cm), respectivamente, nos monólitos A, B e C.



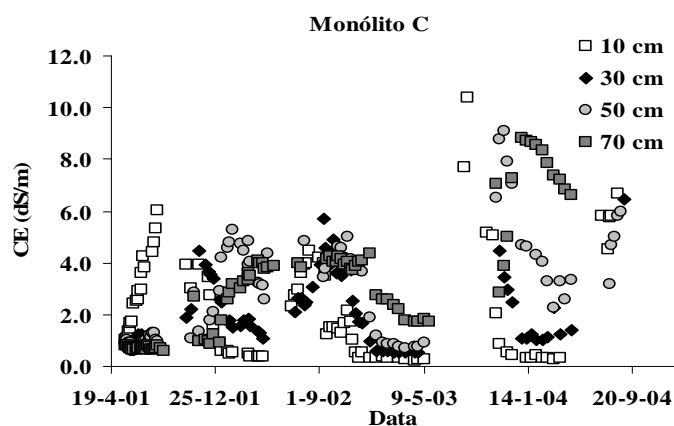


Figura 1 – Evolução da condutividade eléctrica da solução do solo, durante o ensaio, para as 6 qualidades de água estudadas (A=0.3 e 0.8, B= 0.8 e 1.6 e C=1.6 e 3.2 dS m⁻¹).

Após os períodos das chuvas verificou-se, à semelhança do que ocorreu no solo, uma lavagem até cerca de 40 cm, mas um agravamento em profundidade. Assim, por exemplo, em 13 de Abril de 2004 (após as chuvas) e à profundidade de 70 cm, verificaram-se valores de *CE* da solução do solo de 2.3, 3.3 e 6.8 dS m⁻¹ (0.6, 1.5 e 1.8 dS m⁻¹ no início do ensaio) para os monólitos A, B e C, respectivamente. Como já foi referido não nos foi possível avaliar a concentração da solução do solo no fim do 4º período de lavagem pela chuva (2004/2005), mas a avaliar pelo comportamento do solo (Quadro 4) a lavagem deve ter sido muito reduzida.

Elaborou-se um balanço de sais em termos de catiões extraíveis Na⁺, Mg²⁺ e Ca²⁺, para os 3 monólitos de solo, até 1 m de profundidade, considerando o período de Maio de 2001 a Dezembro de 2005. Os resultados encontram-se no Quadro 7.

Quadro 7 - Balanço dos catiões extraíveis, até 1 m de profundidade, nos 3 monólitos

Catião extraível	Monólito	Q _i ¹	Q _r ²	Q _f ³ (g m ⁻³)	Q _{acu} ⁴	Q _l ⁵
Na ⁺	A	64	78	187	123	+45
	B	64	240	217	153	-87
	C	64	604	336	272	-332
Mg ²⁺	A	456	110	462	6	-103
	B	456	210	502	46	-164
	C	456	332	586	130	-202
Ca ²⁺	A	1620	56	1623	3	-53
	B	1620	86	1676	56	-30
	C	1620	137	1718	98	-39

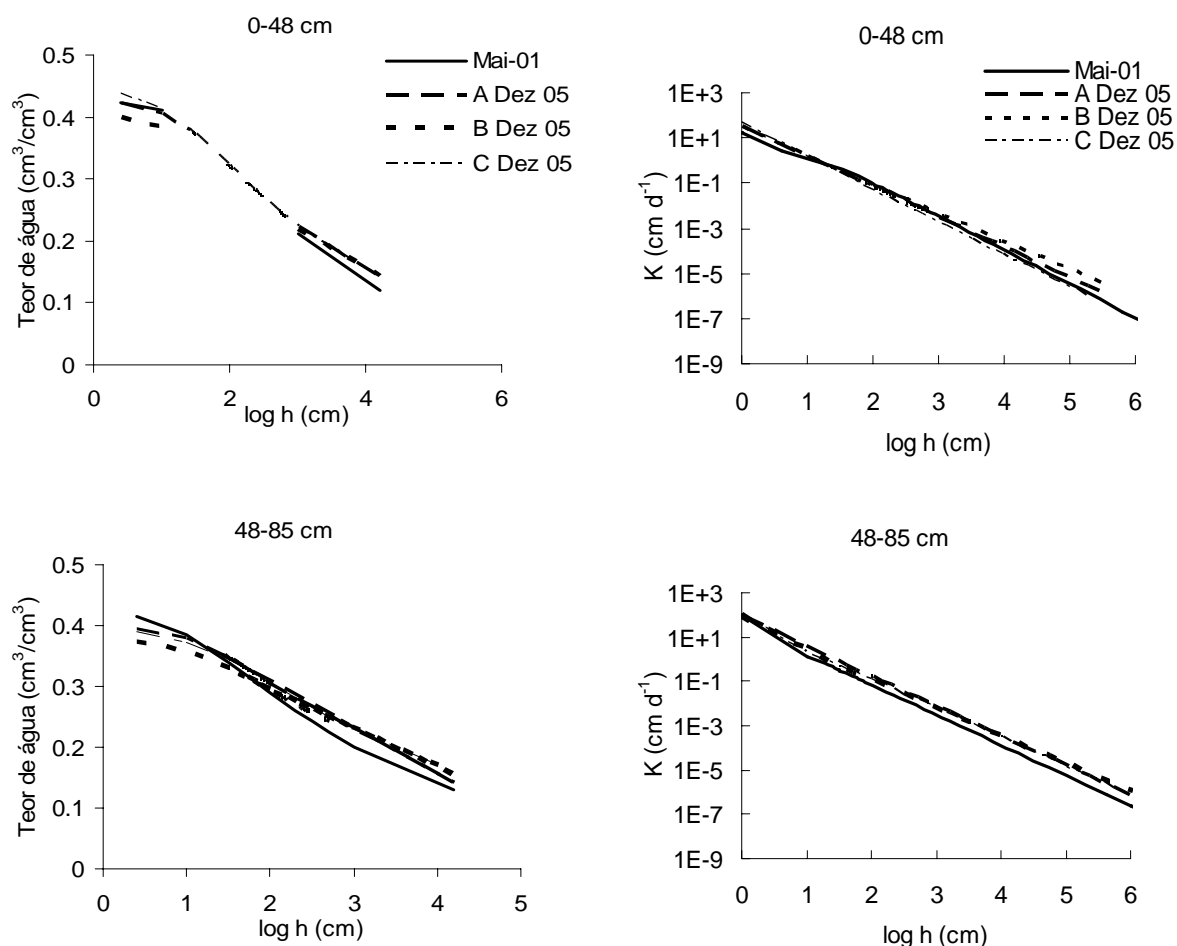
¹Q_i = Quantidade inicial no solo; ²Q_r = Quantidade aplicada na rega; ³Q_f = Quantidade final no solo; ⁴Q_{acu} = Quantidade acumulada no solo; ⁵Q_l = Quantidade lixiviada

Os resultados apresentados no Quadro 7 indicam uma acumulação de sódio de cerca de 2.5 vezes do valor inicial do solo no monólito B e cerca de 4 vezes no monólito C. Os resultados referentes ao monólito A estão certamente afectados de erro pois verificou-se uma acumulação de cerca de 45 g m⁻³ de solo superior à que foi aplicada com a rega.

Este erro poderá ter ocorrido nas leituras laboratoriais das concentrações daquele catião devido aos seus baixos valores, nomeadamente nos dois primeiros anos do ensaio, em que a água de rega aplicada ao monólito A tinha uma condutividade de 0.3 dS m^{-1} .

Verifica-se ainda uma lixiviação importante de Na^+ no monólito C, o que confirma o papel relevante da chuva na lavagem dos sais. O balanço do magnésio e do cálcio é semelhante ao do sódio embora as quantidades acumuladas e lixiviadas sejam menores e concordantes com as aplicações daqueles catiões através da água de rega.

Da medição das propriedades hidráulicas do solo no início (Maio 2001) e no fim (Dezembro de 2005) dos ensaios nas 3 camadas que constituíam o perfil do solo resultaram as curvas da retenção da água no solo e da condutividade hidráulica obtidas nos 3 monólitos para cada camada de solo que se mostram na Figura 2.



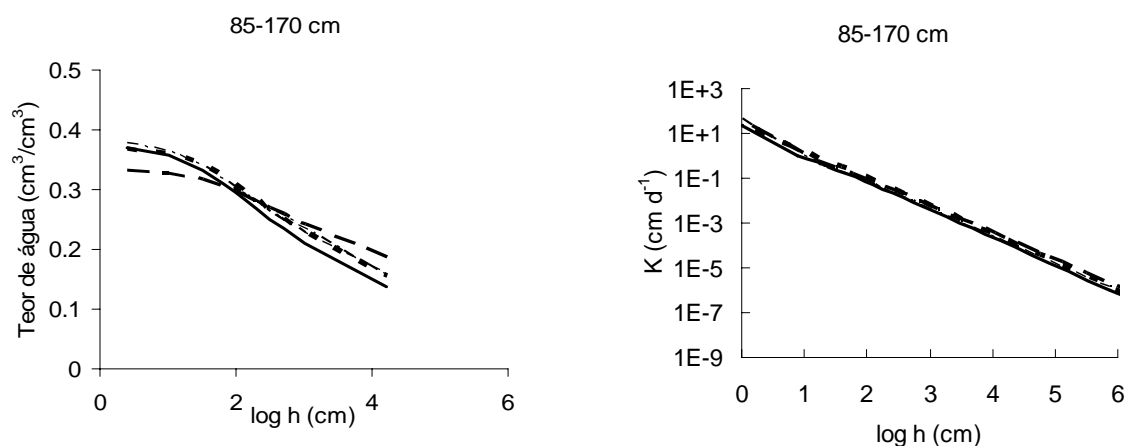


Figura 2 - Curvas de retenção da água no solo e curvas da condutividade hidráulica no início (Maio de 2001) e no fim (Dezembro de 2005) dos ensaios nos 3 monólitos estudados.

As ligeiras diferenças observadas nas propriedades hidráulicas do solo no fim dos ensaios, em relação aos valores iniciais, não indicam uma alteração física relevante mesmo no caso do monólito C, regado com uma água de 3.2 dS m^{-1} , cujas propriedades físicas poderiam ter sido alteradas por via de uma eventual sodização do solo. Assim, e no caso da curva de retenção da água no solo, verificaram-se pequenas variações entre o teor de água na saturação, associado à porosidade total do solo, para as diferentes profundidades dos 3 monólitos, mantendo-se os declives das curvas muito semelhantes.

Apenas para os monólitos A (85-170 cm), e B (48-85 cm) se verificaram as maiores alterações entre o teor de água na saturação e também do declive das curvas. As curvas da condutividade hidráulica são muito semelhantes tendo-se apenas verificado um ligeiro aumento da condutividade hidráulica saturada. Estas propriedades, especialmente a condutividade hidráulica, apresentam uma grande variabilidade espacial, que deve neste caso justificar as pequenas diferenças observadas, mais a mais porque a colheita de amostras inicial foi efectuada apenas num pedone o qual se situava numa área marginal à da futura instalação dos monólitos.

Conclusões

No Aluviossolo de textura mediana estudado, e considerando a precipitação total ocorrida nos 5 anos do ensaio (1828 mm), a utilização de águas de rega até 3.2 dS m^{-1} não conduziu à salinização/sodização do solo, embora no fim dos ciclos de rega, a salinidade do solo e a da solução do solo tenha aumentado notoriamente nas camadas superficiais (0-40 cm). Contudo, os sais foram sendo lixiviados pela água das chuvas, mais eficientemente até 40 cm de profundidade, e no final do ensaio, os valores da *CE* do solo, embora superiores aos iniciais, não ultrapassaram 1 e 2 dS m^{-1} , respectivamente para as profundidades de 0-40 e de 40-100 cm.

Os valores do *SAR* e do *ESP* aumentaram com a regas, mais expressivamente até aos 40 cm, não sendo tão evidente como no caso da *CE* o efeito da lavagem pela chuva. No caso do *SAR* foram atingidos valores, na camada superficial (0-20 cm) e no final do ensaio, de 3, 4 e 7 (monólitos A, B e C) que representam um aumento de 4, 5 e 9 vezes

em relação aos valores iniciais. Os valores do *ESP*, para aquela mesma camada, foram reduzidos de 8 para 6% nas condições mais desfavoráveis (monólito C). De qualquer forma os valores de *ESP* obtidos não são de molde a provocar riscos imediatos de sodização do solo.

O balanço dos sais indicou uma acumulação de sódio, certamente no complexo de troca do solo, de cerca de 2.5 e 4 vezes nos monólitos B e C. No monólito C ocorreu uma lixiviação importante daquele catião. No caso do Mg^{2+} e Ca^{2+} o balanço seguiu o comportamento do Na^+ , embora as quantidades acumuladas e lixiviadas sejam menores e concordantes com as respectivas aplicações através da rega.

As propriedades hidráulicas do solo apresentaram um comportamento muito semelhante no fim e início do ensaio. As pequenas variações observadas devem-se certamente à variação espacial daquelas propriedades.

Tem contudo de se ter em atenção que estas conclusões não são generalizáveis e só são válidas para o tipo de solo estudado, o qual apresentava características hidráulicas favoráveis, com valores da condutividade hidráulica saturada de cerca de 18 (0-48 cm) e 99 cm/dia (48-85 cm). A tendência verificada para o agravamento da salinidade abaixo dos 40 cm e da sodicidade até cerca dos 60/70 cm constitui uma preocupação a ter em conta quando se procede à aplicação continuada de água de rega de má qualidade, nomeadamente em novas áreas de regadio a implementar e especialmente quando ocorrem anos secos (precipitação escassa no Outono-Inverno) e os solos apresentam uma cinética mais lenta.

Agradecimentos

Este estudo foi efectuado no âmbito dos Projectos PIDDAC 150/00 e AGRO 727.

Referências bibliográficas

Alvim, A. 1980. Qualidade da água e riscos de salinização do solo nos perímetros de Campilhas e do Roxo. Congresso 80, Ordem dos Engenheiros, 23 a 29 Março, Coimbra.

Alvim, A & Nunes, J. 1984. Qualidade da Água de Rega e Risco de Halomorfização do Solo nos Perímetros de Rega do Sul de Portugal (1980 a 1982). Ministério da Agricultura, Florestas e Alimentação. Direcção Geral de Hidráulica e Engenharia Agrícola, Lisboa.

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). Revista de Ciências Agrárias, Vol. XXVII (1): 113-126.

Gonçalves, M. C., Martins, J. C., Neves, M. J., Pires, F. P., Oliveira, A., Bica, J. & Bica, M. 2005. Impacto da qualidade da água de rega no solo. Estudo da salinização e da

sodicização de um Aluviossolo, em Alvalade-Sado, Alentejo. *Revista de Ciências Agrárias*, vol. XXVIII nº 2: 177-188.

Greene, R. S. B., Posner, A. M. & Quirk, J. P. 1978. A study of the coagulation of montmorillonite and illite suspensions by CaCl_2 using the electron microscope. In W. W. Emerson, R. D. Bond and A. R. Dexter (ed.). *Modification of soil structure*: 35-40. John Wiley and Sons, New York.

Herrera, J.B.L. 1999. *Handbook of Agriculture*, Marcel Dekker, Spain, 768 pp.

Keren, R. 2000. Salinity. In M. E. Sumner (ed) *Handbook of Soil Science*, pp. G3-G25. CRC Press, Boca Raton, USA.

Martins, J. C., Gonçalves, M. C., Gonçalves, A. R., Rodrigues, C. P., Pires, F. P. & Oliveira, A. 2001. Qualidade da água de rega e riscos de salinização e de alcalização de solos do Alentejo. *Revista de Ciências Agrárias*, Vol XXIV (3 e 4): 324-336.

Martins, J. C., Gonçalves, M. C., Pires, F. P., Oliveira, A. V., Gonçalves, A. R., & Rodrigues, C. P. 2004. Salinização de um Fluvissoilo regado com águas de qualidade diferente, em condições de estufa e de campo. *Revista de Ciências Agrárias*, Vol. XXVII (1): 72-85.

Sequeira, E., Gomes, M. P., Silva, A. S., Silva, J. M. Vieira., Martins, J. C., Gonçalves, M. C., Pires, F. P., Barreiros, F., Oliveira, A., Varela, J., Vicente, J., Nunes, M., Rodrigues, M. J., Rodrigues, C., Cravo, M. L., Azinhais, F., Pires, S. & Louro A. 1994. *Estudo de Impacte Ambiental do Empreendimento de Alqueva. Área: Solos*. Departamento de Pedologia, Estação Agronómica Nacional, Oeiras.