

Previsão da qualidade do solo em áreas regadas com águas salinas

Prediction of soil quality in areas irrigated with saline waters

N. L. Castanheira¹, T. B. Ramos², M. C. Gonçalves², A. Prazeres²,
J. C. Martins², M. L. Fernandes², F. P. Pires² & F. L. Santos¹

RESUMO

Neste trabalho pretendeu-se prever a salinização e sodicização de dois solos com diferentes texturas, quando regados com águas salinas combinadas com fertirrigação diferenciada e após subsequente lavagem no período Outono-Inverno. A condutividade eléctrica do extracto de saturação e da solução do solo foi usada como indicador de salinidade. A percentagem de sódio de troca (*ESP*) e razão de adsorção de sódio (*SAR*) foram os indicadores usados para caracterizar a sodicidade do solo. As relações entre indicadores foram analisadas por regressão múltipla. Os melhores resultados de previsão foram encontrados para o indicador *SAR* no solo de textura mediana e nos períodos após a rega e a lavagem, enquanto que no solo de textura grosseira foram observados no período após lavagem. Verificou-se que o azoto aplicado contribui para a salinidade da solução do solo quando a água de rega contém baixo teor em sais. Como regra, à medida que a qualidade da água de rega se reduz, o azoto contribui para diminuir a salinidade da solução do solo.

Palavras-chave: azoto, rega, salinidade, sodicidade.

ABSTRACT

This work aims predicting salinization and sodification in two soils with different textures when they are irrigated with saline waters combined with different fertirrigation levels, and after the fall/winter rainfall washout of the soil. The electrical conductivity of the saturation paste and of the soil solution was used as soil salinity indicator. The exchangeable sodium percentage (*ESP*) and sodium adsorption ratio (*SAR*) were used to characterize soil sodicity. Relationships between the indicators were studied with multiple regression analysis. The results reveal that better predictions are obtained when the indicator *SAR* is used for the medium textured soil and when the irrigation season and the rain washout period are taken into consideration, but for the coarse textured soil such predictions are best obtained only after the rain period. The applied nitrogen also contributes to soil solu-

¹ Dep. Eng. Rural, ICAM, Universidade de Évora, Pólo da Mitra, Apartado 94, 7000-554 Évora, e-mail: npsc@uevora.pt; ² Instituto Nacional de Recursos Biológicos, L-INIA, ex. Estação Agronómica Nacional, Av. República, Quinta do Marquês, 2784-505 Oeiras

tion salinity only when low salt content is observed in the irrigation water. As a general rule, as the water quality decreases, nitrogen applications contribute to diminish the soil solution salinity.

Key-words: fertilizer, irrigation, salinity, sodicity.

INTRODUÇÃO

A salinização do solo é uma das principais preocupações em áreas de regadio Mediterrânicas em que, frequentemente, a água disponível para a rega apresenta conteúdos elevados em sais. Esta prática induz riscos acrescidos de acumulação de sais na zona das raízes das culturas, com consequentes decréscimos de produção e da fertilidade do solo (Läuchli & Epstein, 1990).

O excesso de Na^+ e pH muito elevado de águas de rega salinas conduz à salinização e sodicização do solo, promovendo a expansão e/ou a dispersão da argila, alterando a geometria dos poros do solo, a permeabilidade intrínseca do solo, a retenção e armazenamento de água e a sua produtividade (Keren, 2000). A dispersão da estrutura do solo origina a compactação superficial do solo e a destruição da sua estrutura, o bloqueio da porosidade e a redução da taxa de infiltração, aumentando o escorrimento e diminuindo a disponibilidade de água para as culturas.

Para avaliar o estado de sodicização de um solo são usados, entre outros, os parâmetros percentagem de sódio de troca (*ESP*) e razão de adsorção de sódio (*SAR*) (Levy, 2000). O primeiro descreve o nível de Na^+ adsorvido no solo, enquanto o segundo descreve o Na^+ presente na água de rega ou na solução do solo. De acordo com o U.S. Salinity Laboratory (Richards, 1954) e WRB (2006), um solo é considerado sódico

quando as suas propriedades físicas são adversamente afectadas pelo sódio, apresentando um *ESP* > 15 ou o somatório de Na e Mg > 50 %. É, contudo, considerado salino quando apresenta a condutividade do extracto de saturação (*CE*) superior a 4 dSm^{-1} . Os solos com *CE* > 4 dSm^{-1} e *ESP* > 15 ou $\text{Na}+\text{Mg}$ > 50 % são denominados de sódico-salinos.

A qualidade do solo é frequentemente definida como a capacidade de dado tipo específico de solo poder funcionar como ecossistema e sustentar as actividades humanas, animais, vegetais e, ainda, promover a qualidade ambiental (Doran & Parkin 1994, Karlen *et al.* 1997 e Seybold *et al.* 1998). No caso da salinização/sodicização, os parâmetros a usar como indicadores são de natureza química, tais como a *CE* e o *SAR*, e são também identificados por Andrews *et al.* (2004) como importantes em regiões áridas.

Neste trabalho apresentam-se diversas equações de regressão múltipla para prever a qualidade do solo e da sua solução, avaliadas através dos indicadores de salinidade (*CE*) e sodicidade (*SAR* e *ESP*), quer nos períodos após os ciclos de rega, quer após os períodos de lavagem do solo. As equações foram obtidas a partir de estudos realizados e de resultados por Santos *et al.* (2008) em que, através de um sistema de rega gota-a-gota em Fonte Tripla Linear, foram aplicadas ao solo várias combinações de água salina e fertilizante azotado.

MATERIAL E MÉTODOS

Ao longo de três anos (2004 a 2006), foi estudado o comportamento de um Fluvissole eútrico de textura mediana (Alvalade-Sado) e de um Antrossolo hórtico de textura ligeira (Mitra - Évora) quanto à aplicação de sais e fertilizante azotado na água de rega. Estes

solos encontram-se caracterizados em Santos *et al.* (2008) e são aqui indicadas, apenas, algumas características relativas ao estado de salinidade/sodicidade no início dos ensaios. O Fluvissoilo êutrico e o Antrossolo hórtico apresentavam, respectivamente, a condutividade eléctrica do extracto de saturação (C_{Ee}) de 0,42 e 0,48 dSm^{-1} , o SAR de 3,25 e 0,38 $(meq L^{-1})^{0.5}$ e o ESP de 2,06 e 0,63 %.

O sistema de rega utilizado é denominado de Fonte Tripla Linear (Figura 1), sendo adaptado de Malach *et al.*, 1995. Permite, numa área reduzida, a conjugação de diversas combinações de sal e de fertilizante azotado provenientes de 3 fontes de água: *água salina* (água de rega com NaCl dissolvido), *água de rega* (não salina) e *água + fertilizante* (água de rega com adição de NH_4NO_3). São assim obtidos dois gradientes cruzados, um com 3 níveis diferentes de salinidade (Modalidades A, B e C, decres-

cente ao longo da linha de cultura e nulo na modalidade C), e outro com 4 níveis de fertilização azotada (Grupos I a IV, decrescente do grupo I para o grupo IV, com aplicação nula).

As 3 fontes de água provêm de três tubagens de rega instaladas ao longo de cada linha de cultura, em que os gradientes são impostos por variações no débito dos gotejadores em cada ponto de rega (Quadro 1). A dotação aplicada em cada ponto de rega mantém-se constante, debitando $18 Lh^{-1}$ por metro linear de cultura de milho.

A água de rega usada nos campos experimentais foi classificada segundo o U.S. Salinity Laboratory (Richards, 1954), como C_3S_1 em Alvalade e C_2S_1 na Mitra, significando um risco elevado e médio de salinidade, e baixo risco de sodicização. A qualidade destas águas foi posteriormente alterada com adição de sais (NaCl), e classificadas

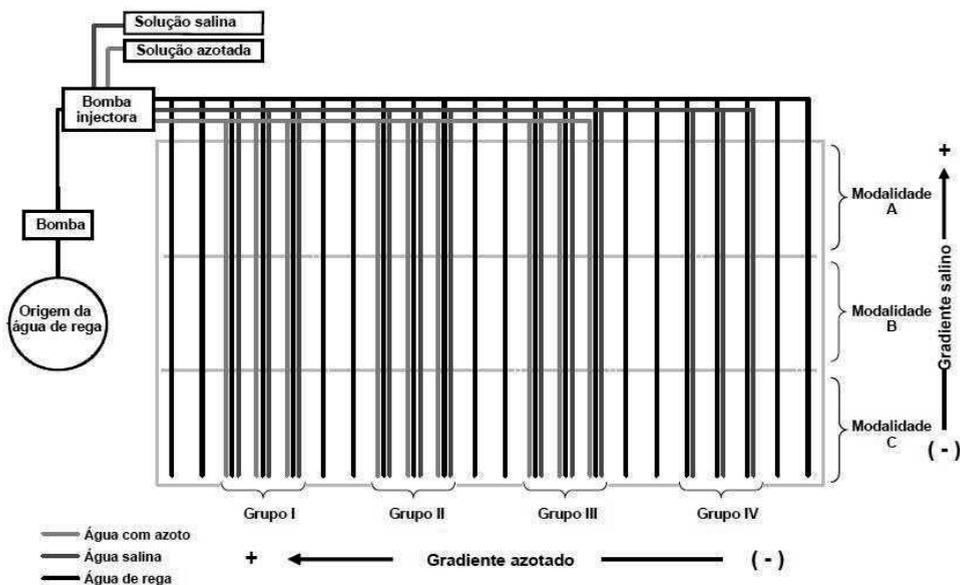


Figura 1 – Esquema em Fonte Tripla Linear, onde se observa os gradientes de fertilizante e sal que originam as várias modalidades.

Quadro 1 – Esquema dos campos experimentais, podendo-se observar os 4 grupos e as 3 modalidades e os respectivos débitos em cada ponto de rega.

| Mod. | Taxas de aplicação (Lh ⁻¹) | | | | | | | | | | | |
|------|--|---|------|---------------------|---|------|---------------------|---|------|---------------------|---|------|
| | Grupo I | | | Grupo II | | | Grupo III | | | Grupo IV | | |
| | Sal | N | Água | Sal | N | Água | Sal | N | Água | Sal | N | Água |
| A | 12 | 6 | 0 | 12 | 4 | 2 | 12 | 2 | 4 | 12 | 0 | 6 |
| B | 6 | 6 | 6 | 6 | 4 | 8 | 6 | 2 | 10 | 6 | 0 | 12 |
| C | 0 | 6 | 12 | 0 | 4 | 14 | 0 | 2 | 16 | 0 | 0 | 18 |
| | 18 Lh ⁻¹ | | | 18 Lh ⁻¹ | | | 18 Lh ⁻¹ | | | 18 Lh ⁻¹ | | |

como C₄S₁, devido ao aumento do risco de salinização para muito elevado. As várias quantidades de sais (Na⁺) aplicados por modalidade nos 3 anos de ensaios encontram-se no Quadro 2, e correspondem aos TDS (Total de Sais Dissolvidos). A pluviosidade durante os 3 anos de ensaio foi inferior à média, em particular nos anos de 2004 e 2005, em que foram registados 200 e 400 mm, respectivamente. No ano de 2006, regressou aos valores médios da região, tendo sido registados cerca de 600 mm de precipitação.

Os TDS obtidos experimentalmente foram

convertidos em valores médios de CE, em cada ano e tratamento (Quadro 3), através da equação (Richards, 1954)

$$TDS \text{ (g L}^{-1}\text{)} \approx 0,64 \times CE \text{ (dSm}^{-1}\text{)} \quad (1)$$

A evolução da condutividade eléctrica, CE, da solução do solo foi monitorizada durante os 3 ciclos de rega e na subsequente lavagem pela água da chuva durante o período Outono/Inverno. Foram usadas amostras recolhidas com cápsulas porosas ou lisímetros às profundidades de 20, 40 e 60 cm, nas modalidades A e C em todos os

Quadro 2 – Quantidade total de água de rega (R em mm), de sais na água de rega salina (Na⁺) e de fertilizante azotado (N) aplicados por modalidade, nos 3 anos de ensaio.

| Grupos | Mod. | Sal – Na ⁺ (g m ⁻²) | | | | | | Fertilizante -N (g m ⁻²) | | | | | |
|--------|------|--|-------|------|-------|------|-------|--------------------------------------|-------|------|-------|------|-------|
| | | 2004 | | 2005 | | 2006 | | 2004 | | 2005 | | 2006 | |
| | | Alv. | Mitra | Alv. | Mitra | Alv. | Mitra | Alv. | Mitra | Alv. | Mitra | Alv. | Mitra |
| I | A | 1365 | 1352 | 2055 | 962 | 2792 | 1229 | 19 | 9 | 20 | 15 | 22 | 21 |
| | B | 683 | 676 | 1027 | 481 | 1396 | 614 | 19 | 9 | 20 | 15 | 22 | 21 |
| | C | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 19 | 9 | 20 | 15 | 22 | 21 |
| II | A | 1365 | 1352 | 2055 | 962 | 2792 | 1229 | 13 | 6 | 13 | 10 | 15 | 14 |
| | B | 683 | 676 | 1027 | 481 | 1396 | 614 | 13 | 6 | 13 | 10 | 15 | 14 |
| | C | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 13 | 6 | 13 | 10 | 15 | 14 |
| III | A | 1365 | 1352 | 2055 | 962 | 2792 | 1229 | 6 | 3 | 7 | 5 | 7 | 6 |
| | B | 683 | 676 | 1027 | 481 | 1396 | 614 | 6 | 3 | 7 | 5 | 7 | 6 |
| | C | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6 | 3 | 7 | 5 | 7 | 6 |
| IV | A | 1365 | 1352 | 2055 | 962 | 2792 | 1229 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | B | 683 | 676 | 1027 | 481 | 1396 | 614 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | C | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| R (mm) | | 997 | 1067 | 1012 | 725 | 1028 | 729 | | | | | | |

Quadro 3 – Valores de Condutividade eléctrica média das águas de rega (CE_w) aplicadas nos vários grupos e modalidades nos 3 anos de ensaio.

| Grupos | Mod. | CE_w média (dS m ⁻¹) | | | | | |
|--------|------|------------------------------------|-------|------|-------|------|-------|
| | | 2004 | | 2005 | | 2006 | |
| | | Alv. | Mitra | Alv. | Mitra | Alv. | Mitra |
| I | A | 2,14 | 1,98 | 3,17 | 2,07 | 4,24 | 2,71 |
| | B | 1,07 | 1,00 | 1,59 | 1,04 | 2,12 | 1,35 |
| | C | 0,80 | 0,30 | 0,80 | 0,30 | 0,80 | 0,30 |
| II | A | 2,14 | 1,98 | 3,17 | 2,07 | 4,24 | 2,71 |
| | B | 1,07 | 1,00 | 1,59 | 1,04 | 2,12 | 1,35 |
| | C | 0,80 | 0,30 | 0,80 | 0,30 | 0,80 | 0,30 |
| III | A | 2,14 | 1,98 | 3,17 | 2,07 | 4,24 | 2,71 |
| | B | 1,07 | 1,00 | 1,59 | 1,04 | 2,12 | 1,35 |
| | C | 0,80 | 0,30 | 0,80 | 0,30 | 0,80 | 0,30 |
| IV | A | 2,14 | 1,98 | 3,17 | 2,07 | 4,24 | 2,71 |
| | B | 1,07 | 1,00 | 1,59 | 1,04 | 2,12 | 1,35 |
| | C | 0,80 | 0,30 | 0,80 | 0,30 | 0,80 | 0,30 |

Grupos em Alvalade e nos grupos I, III e IV na Herdade da Mitra.

Para a obtenção de séries temporais da CE_e , SAR e ESP no extracto de saturação do solo, colheram-se amostras em todos os grupos e modalidades (a 3 profundidades: 0-20, 20-40, 40-60 cm) no início dos ensaios, após os 3 ciclos de rega (Setembro) e no fim dos períodos chuvosos (Abril/Maio do ano seguinte). Para o cálculo do ESP usou-se a capacidade de troca catiónica expressa em $cmol_c\ kg^{-1}$ de solo a pH 7,0.

Foi realizada uma análise de regressão múltipla com *stepwise* para avaliar a possibilidade de se prever a CE da solução do solo do Fluvissole e Antrossolo ao longo do tempo, efectuada entre os valores de CE (variável dependente) da solução do solo obtidos com as cápsulas porosas e as quantidades de água (R), azoto (N) e sódio (Na^+) aplicados em cada ano (variáveis independentes) para os dois locais de ensaio no seu conjunto. Os tipos de solo (Solo) e a profundidade foram também

considerados.

Em relação ao solo, as relações causa-efeito entre os indicadores CE_e , SAR e ESP do extracto de saturação do Fluvissole e Antrossolo foram estudadas através de análise de regressão múltipla com *stepwise*. Estabeleceram-se várias regressões entre os valores de CE_e , SAR e ESP (variáveis dependentes) obtidos, com as quantidades de água de rega (R) e da precipitação ocorrida, da CE da água de rega (CE_w) e azoto (N) aplicados em cada ano (variáveis independentes), para os dois locais separadamente e em dois eventos distintos: o final dos ciclos de rega e após a lavagem pela chuva. Os tipos de solo (Solo) e a profundidade foram também considerados.

As análises de regressão múltipla foram obtidas com o programa Statgraphics Plus 5.1. Os valores dos parâmetros monitorizados ao longo de três anos de ensaio, e que servem de base aos cálculos estatísticos apresentados, encontram-se descritos em Castanheira *et al.* (2007) e Santos *et al.* (2008).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Solução do solo

Os parâmetros da equação de regressão múltipla e os coeficientes de determinação da equação resultante são apresentados no Quadro 4.

A análise de variância revelou uma soma de quadrados da regressão (SSR) de 9436,31 e uma soma de quadrados do erro (SSE) de 3330,37 e relação linear significativa entre as variáveis critério e o conjunto das variáveis predictoras, $F_{(11,1389)} = 357,78$, $p < 0,001$. A capacidade explicativa desta regressão é dada pelo coeficiente de determinação de 0,74 (grau de significância de 99%).

Na Figura 2 apresenta-se a estimativa da CE da solução do solo aos 10 cm de profundidade, com diversas combinações de N e Na^+ na água de rega, para um ciclo de rega de 700 e 1000 mm.

Os valores mais elevados de CE na solução do solo foram verificados, como espec-tável, com os teores mais elevados de Na^+ aplicado na água de rega. Verificou-se,

ainda, que quando a água de rega apresentava um baixo teor de sais o N aplicado contribui para a salinidade da solução do solo. À medida que este teor em sais

Quadro 4 – Coeficientes de regressão, determinação e níveis de significância das equações obtidas para a CE da solução do solo nos dois locais.

| Mitra e Alvalade | |
|-----------------------------|-----------------|
| Parâmetro | CE |
| Constante | 4,878 |
| Solo | -1,71 |
| Profundidade | 0,147 |
| N | -0,0714 |
| N^2 | -0,0021 |
| Na^+ | 0,0013 |
| $(Na^+)^2$ | $8,83 E^{-07}$ |
| Rega | -0,0047 |
| $Rega^2$ | $4,07 E^{-06}$ |
| $N \times Na^+$ | $-4,13 E^{-05}$ |
| $N \times Rega$ | $2,43 E^{-04}$ |
| $N \times Na^+ \times Rega$ | $-9,26 E^{-08}$ |
| R^2 | 0,74 |
| <i>n.º observações</i> | 1400 |

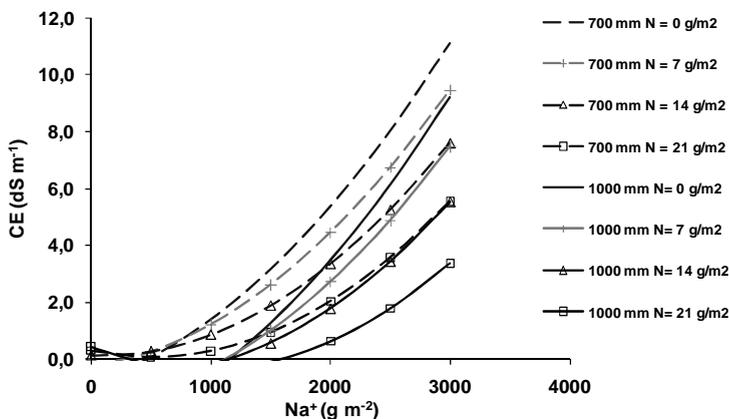


Figura 2 – Estimativa da CE da solução do solo com diversas concentrações de azoto e de sódio para o Fluvissole e Antrossolo aos 10 cm, com rega de 700 mm.

aumenta e a qualidade da água de rega diminui, o azoto contribuiu para diminuir a salinidade da solução do solo. Este efeito é mais importante com aplicação de maior quantidade de água de rega.

Extracto de saturação do solo

Nos Quadros 5 e 6 são apresentados os coeficientes de regressão, de determinação e os respectivos níveis de significância para as equações obtidas. As análises de variância indicam a existência de relação linear significativa entre as variáveis dependentes *CEe*, *SAR* e *ESP* e algumas das variáveis independentes contempladas (Quadros 5 e 6).

Obtiveram-se coeficientes de determinação (R^2) para o Antrossolo que variam entre

0,65 e 0,74, no final dos ciclos de rega ($n=107$ observações) e entre 0,64 e 0,87, após o período das chuvas (com $n=71$ observações). Para o Fluvisso, os R^2 variaram entre 0,72 e 0,82 no caso do fim do ciclo de rega e entre 0,60 e 0,86 após o ciclo chuvoso ($n= 107$ observações nos dois casos). Já para o final do período de lavagem, com amostras de 72 observações, os valores de R^2 situaram-se entre 0,64 e 0,87 no Antrossolo (Mitra) e entre 0,60 e 0,86 no Fluvisso (Alvalade).

A previsão menos conseguida, ocorreu para a *CEe* no Fluvisso após o período das chuvas, com R^2 de, apenas, 0,60. Não foram reconhecidas interações estatisticamente significativas entre a *CEe* do solo e a quantidade de N aplicado na água de rega após o ciclo de rega e após a lavagem pelas chuvas,

Quadro 5 – Coeficientes de regressão, determinação e níveis de significância das equações ajustadas para a *CEe*, *SAR* e *ESP* do solo no final dos ciclos de rega nos dois locais.

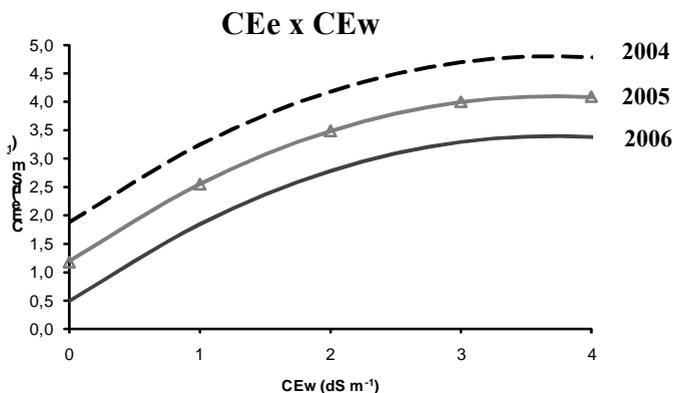
| Parâmetro | Antrossolo – Mitra | | | Fluvisso – Alvalade | | |
|---------------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|---------------------|------------|------------|
| | <i>CEe</i> | <i>SAR</i> | <i>ESP</i> | <i>CEe</i> | <i>SAR</i> | <i>ESP</i> |
| Constante | -0,1695 | -204,17 | -219,13 | -3976,21 | -6621,87 | 16394,8 |
| N | -0,2345 | -0,8767 | -1,8434 | -- | -- | 6,66 |
| N ² | 0,0082 | -- | -- | -- | -- | -- |
| <i>CEw</i> | -- | 3,42 | -- | -35,78 | -- | -- |
| <i>CEw</i> ² | -- | -- | -- | -0,4769 | -1,23 | -- |
| Profundidade | 0,0743 | 0,181 | -- | -- | -- | 2,28 |
| Rega | -- | 0,4757 | 0,5168 | 7,88 | 13,01 | -32,49 |
| Rega ² | 4,4 E ⁻⁰⁶ | 2,7 E ⁻⁰⁴ | -2,9 E ⁻⁰⁴ | -0,0039 | -0,0064 | 0,0161 |
| N x <i>CEw</i> | 0,0546 | -- | -- | -- | -0,0454 | -0,041 |
| N x Profundidade | 0,0016 | -- | -- | -- | -- | -- |
| N x Rega | -- | 0,0012 | 0,0025 | -- | -- | -0,0065 |
| <i>CEw</i> x Profundidade | 0,0086 | -- | -- | -0,0179 | -0,0474 | -- |
| <i>CEw</i> x Rega | -- | -- | 0,0017 | 0,0388 | 0,0097 | 0,0014 |
| Profundidade x Rega | 1,3 E ⁻⁰⁴ | 1,9 E ⁻⁰⁴ | 4,4 E ⁻⁰⁵ | -- | -- | -0,0023 |
| SSR | 124,022 | 940,814 | 740,067 | 284,159 | 1472,620 | 611,135 |
| SSE | 65,639 | 341,297 | 252,889 | 95,491 | 329,535 | 236,741 |
| F | 23,38 | 39,38 | 49,26 | 50,09 | 75,22 | 31,95 |
| R^2 | 0,65 | 0,73 | 0,74 | 0,75 | 0,82 | 0,72 |
| n. ° observações | 108 | 108 | 108 | 108 | 108 | 108 |

Com $p = 0,0000$ e $\alpha = 0,001$ para todas as regressões

Quadro 6 – Coeficientes de regressão, determinação e níveis de significância das equações ajustadas para a *CEe*, *SAR* e *ESP* do solo após a lavagem pela chuva nos dois locais.

| Parâmetro | Antrossolo – Mitra | | | Fluvissoilo – Alvalade | | |
|---------------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|------------------------|----------------------|-----------------------|
| | <i>CEe</i> | <i>SAR</i> | <i>ESP</i> | <i>CEe</i> | <i>SAR</i> | <i>ESP</i> |
| Constante | 0,5818 | 0,3397 | 2,78 | 3,37 | 29,91 | 0,1026 |
| N | 0,0327 | 0,4116 | -- | -- | -- | -- |
| N ² | -- | -- | -- | -- | -0,0125 | -- |
| <i>CEw</i> | 0,3542 | 2,71 | -- | 1,46 | 4,01 | 0,2838 |
| <i>CEw</i> ² | 0,2080 | 1,71 | 0,3247 | -0,2224 | -- | -- |
| Profundidade | -- | -0,0609 | -0,0585 | -0,0791 | -- | -- |
| Chuva | -- | -- | -0,0059 | -0,0049 | -0,1891 | 0,0129 |
| Chuva ² | -- | -- | -- | -- | 2,8 E ⁻⁰⁴ | -- |
| N x <i>CEw</i> | -0,0098 | -0,0881 | -- | -- | -- | 0,0680 |
| N x Profundidade | -5,1E ⁻⁰⁴ | -- | -- | -- | 0,0056 | -- |
| N x Chuva | -- | -7,1 E ⁻⁰⁴ | -- | -- | -- | -2,4 E ⁻⁰⁴ |
| <i>CEw</i> x Profundidade | -- | -- | -- | 0,0113 | 0,0515 | -0,0209 |
| <i>CEw</i> x Chuva | -0,0016 | -0,0097 | -- | -- | -- | -- |
| Profundidade x Chuva | -- | 2,1 E ⁻⁰⁴ | 1,7 E ⁻⁰⁴ | 1,3 E ⁻⁰⁴ | 1,3 E ⁻⁰⁴ | -- |
| <i>SSR</i> | 4,559 | 334,48 | 29,417 | 100,124 | 2550,860 | 897,003 |
| <i>SSE</i> | 0,899 | 50,950 | 16,497 | 67,021 | 423,012 | 449,806 |
| <i>F</i> | 54,92 | 51,70 | 29,87 | 25,15 | 86,15 | 40,68 |
| <i>R</i> ² | 0,83 | 0,87 | 0,64 | 0,60 | 0,86 | 0,67 |
| <i>n.</i> º observações | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 |

Com $p = 0,0000$ e $\alpha = 0,001$ para todas as regressões

**Figura 3** - Estimativa da *CEe* do Fluvissoilo aos 10 cm, com diversas concentrações de sódio nos 3 anos de ensaio para os períodos chuvosos.

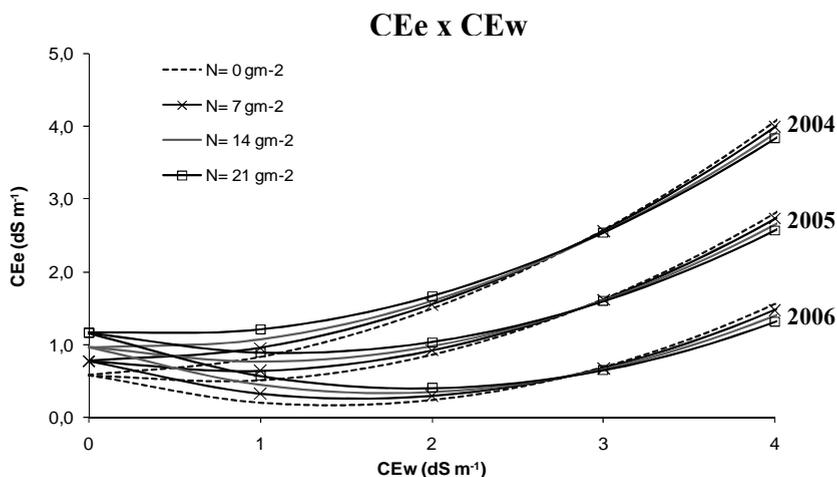


Figura 4 - Estimativa da CE_e do Antrossolo aos 10 cm, com diversas concentrações de azoto e de sódio nos 3 anos de ensaio para os períodos chuvosos.

concluindo-se que o N não contribui positivamente para a salinização deste solo.

Interações significativas foram observadas entre a CE_e do solo e a CE_w , após os períodos chuvosos dos 3 anos de ensaio. Esta estimativa da CE_e é apresentada na Figura 3 para os 10 cm de profundidade,

verificando-se que com o aumento da CE_w aumenta também a CE_e do solo, até ao valor máximo de CE de $3,28 \text{ dS m}^{-1}$, a partir do qual aumentos da salinidade da água de rega não induzem já mais acréscimos de salinidade no extracto de saturação do solo.

Na Figura 4 apresenta-se a previsão de

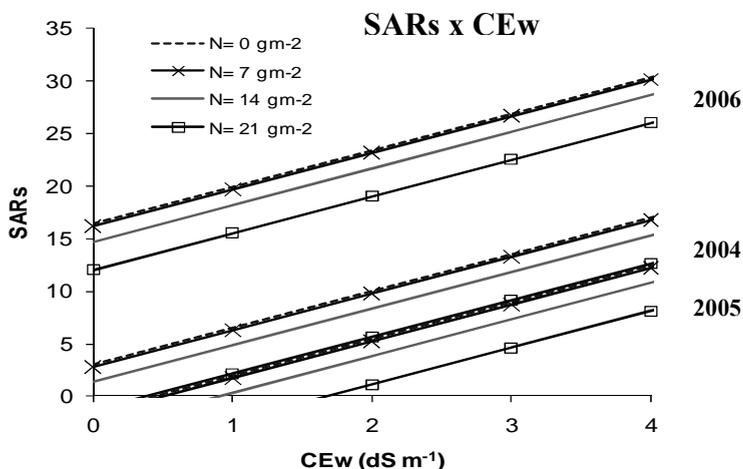


Figura 5 - Estimativa do SAR do solo aos 10 cm, com diversas concentrações de azoto e de sódio para o Fluvissolo nos 3 anos de ensaio para os períodos chuvosos.

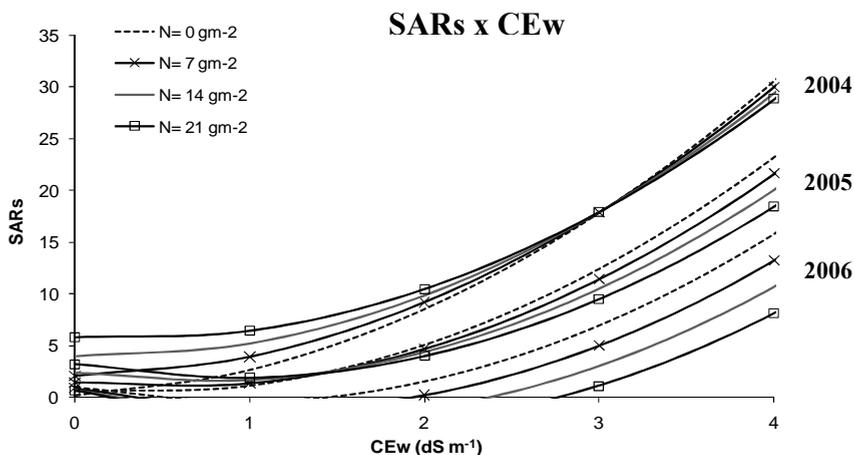


Figura 6 - Estimativa do *SAR* do solo aos 10 cm, com diversas concentrações de azoto e de sódio para o Antrossolo nos 3 anos de ensaio para os períodos chuvosos.

evolução da *CEe* do Antrossolo para os 10 cm de profundidade, em que se observaram interações significativas com a *CEw* e a quantidade de N aplicada na água de rega para os 3 anos de ensaio. Verifica-se que, para teores reduzidos de salinidade da água de rega ($< 1 \text{ dS m}^{-1}$), o N aplicado contribuiu para o aumento da salinidade do extracto de saturação do solo. Para além de 2 dS m^{-1} , a *CEw* contribuiu bastante para a salinidade do extracto de saturação do Antrossolo.

As previsões mais encorajadoras foram encontradas para o parâmetro *SARs* em Alvalade, com valores de R^2 de 0,82 e 0,86 (após a rega e a lavagem) e na Mitra, com 0,87 após a lavagem. Nas Figuras 5 e 6 apresentam-se estas estimativas do *SAR* para os dois solos aos 10 cm de profundidade e após os períodos chuvosos.

A interação da quantidade de N aplicado e da *CEw* revelou ser estatisticamente significativa para a previsão do *SARs* do Fluvisso e do Antrossolo. Para o primeiro solo foi encontrada uma relação linear entre *SARs* e a *CEw* e para o Antrossolo uma relação quadrática, em que em ambos os

solos, com maior quantidade de N aplicado (14 e 21 g m^{-2}) corresponde um *SARs* menor em todos os tratamentos de *CEw* induzidos.

Observou-se que o Fluvisso apresenta um maior risco de sodicização que o Antrossolo, facto que não pode só ser atribuído às características químicas do solo, que apresenta um *SAR* inicial de 3,25, mas também à sua infiltrabilidade reduzida e tendência para a formação de crosta de superfície com as regas, o que propiciou acumulação de sódio nos 3 anos de ensaio. Estudos anteriores, efectuados por Gonçalves *et al.* (2006), referem que a aplicação de água de rega com $3,2 \text{ dS m}^{-1}$ num Fluvisso induziu salinização/sodicização durante o ciclo de rega e que a precipitação ocorrida (445 e 587 mm) não terá sido suficiente para restaurar as condições iniciais de salinidade/sodicidade abaixo dos 40cm.

Já quanto ao Antrossolo, os valores mais elevados de *SARs* foram observados em 2004, ano em que a precipitação foi escassa (cerca de 200 mm), não tendo sido suficiente para promover a lavagem de sais no período Outono/Inverno. Nos anos seguin-

tes, o *SARs* decresceu, indicando a capacidade de lavagem deste solo consequência da sua textura grosseira. Este comportamento foi também observado na previsão da *CEe* (Figura 5).

CONCLUSÕES

Dos três anos de monitorização de um Fluvissoilo êutrico e de um Antrossolo hórtico num ensaio em Fonte Tripla Linear foram observadas como estatisticamente significativas as relações entre as quantidades de N e Na^+ aplicadas na água de rega e a *CE*, *SAR* e *ESP* do solo. A previsão da qualidade do solo com estes indicadores de salinidade e sodicidade mostrou-se possível e estatisticamente representativa por análises de regressão múltipla com R^2 entre 0,60 e 0,87, simulando o comportamento destes solos quando regados com águas salinas (até 4 dS m^{-1}) e com adição de N pela fertilização azotada (até 22 g m^{-2}). Para a simulação da *CE* da solução do solo, a análise de regressão conjunta (Alvalade e Mitra) apresentou um R^2 de 0,74, confirmando que o Na^+ dissolvido na água de rega contribuiu para a salinização da solução do solo.

O Fluvissoilo de textura mediana revelou alguma tendência para a sodicização, mesmo após os períodos chuvosos que, contudo, não se revelaram suficientes para efectuarem lavagem de sais do perfil. O Antrossolo de textura grosseira tem menor capacidade de retenção de água mas mostrou-se favorável à lixiviação do Na^+ após os ciclos de rega, facto mais evidente ainda após a estação das chuvas.

A rega com águas de má qualidade alterou os indicadores da qualidade dos dois solos, em particular do Fluvissoilo de Alvalade. Contudo, a rega com águas salinas torna-se possível principalmente quando suficiente água é fornecida ao solo para promo-

ver a lixiviação dos sais da zona radical das culturas, e outras práticas conservativas são complementarmente usadas.

AGRADECIMENTOS

Este estudo foi realizado no âmbito do projecto PTDC/AGR-AAM/66004/2006 da FCT e AGRO 727, financiado no quadro do Programa AGRO, medida 8.1.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrews, S.S., Karlen, D.L. & Cambardella, C.A. 2004. The soil management assessment framework: A quantitative evaluation using case studies. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 68:1945–1962.
- Castanheira, N.L., Prazeres, A.O., Neves, M.J., Fonte, S.C., Gonçalves, M.C., Santos, F.L., Martins, J.C., Ramos, T. B., Pires, F.P., Reis, J.L., Bica, J. & Bica, M. 2007. Influência da qualidade de água de rega e da adubação azotada no solo e na produção de milho-grão. *Proceedings II Congresso Nacional de Rega e Drenagem*, 26 a 28 de Junho, Fundão, CD-ROM.
- Doran, J.W. & Parkin, T.B. 1994. Defining and assessing soil quality. P. 3-21. In J.W. Doran, D.C. Coleman, D.F. Bezdicek, & B.A. Stewart (eds.), *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. SSSA Special Pub. No. 35. ASA, CSSA and SSSA, Madison, WI, USA.
- Gonçalves, M.C., Šimůnek, J., Ramos, T., Martins, J.C., Neves, M. & Pires, F. 2006. Multicomponent solute transport in soil lysimeters irrigated with waters of different quality. *Water Resour. Res.* 42, W08401, doi:10.1029/2005WR004802.

- Gonçalves, M. C., Fernandes, M. L., Ramos, T. B., Castanheira, N. L., Prazeres, A., Santos, F. L., Martins, J. C., Pires, F. P. & Reis, J. 2007. Interação salinidade/adubação azotada na produção de milho-grão. In N. Bellinfante, A. Jordán (eds.), *Tendencias Actuales de la Ciencia del Suelo*. 13-17 Junho, p. 386-393. Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola, Universidad de Sevilla, Espanha,
- Karlen, D.L., Mausbach, M.J., Doran, J.W., Cline, R.G., Harris, R.F. & Schuman, G.E. 1997. Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Science Society of America Journal*, 61: 4-10.
- Keren, R. 2000. Salinity. In M. E. Sumner (eds) *Handbook of Soil Science*, pp. G3-G25. CRC Press, Boca Raton, USA.
- Levy, G.J. 2000. Sodicity. In Sumner, M.E. (eds). *Handbook of Soil Science*. CRC Press, Boca Raton, G-27-63. USA.
- Malach, Y., Ben-Asher, J., Sagi, M. & Alert, A. 1995. Double Emitter Source (DES): An adaptation of trickle irrigation to the double line source method. *International Water & Irrigation Review*, 15(2):34-39.
- Richards, L. A. 1954. *Diagnosis and Improvement of Saline and Alcaly Soils*. USSL -United States Salinity Laboratory. USDA Handbook 60, 160p. Washington, USA.
- Santos, F. L., Gonçalves, M.C., Leitão, T. E., Neves, R. & Guerreiro, C. 2008. Demonstração e divulgação de gestão integrada da salinidade e da fertilização azotada em solos regáveis do Alentejo. Relatório final do Projecto AGRO 727. Universidade de Évora, Évora, 435 pp.
- Seybold, C.A., Mausbach, M.J., Karlen, D.L. & Rogers, H.H. 1998. Quantification of soil quality. In R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett, and B.A. Stewart (eds.). *Soil processes and the carbon cycle*, pp. 387-404. CRC Press, BocaRaton, USA.
- WRB, 2006. *World Reference Base for Soil Resources. A framework for international classification, correlation and communication*. World Soil Resources Reports 103. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.