

Determinação da salinidade e sodicidade do solo por métodos de indução eletromagnética[‡]

Determination of soil salinity and sodicity using electromagnetic induction[‡]

Ana Marta Paz^{1,*}, Nádía Castanheira¹, Maria Conceição Gonçalves¹, Manuel Fernandes¹, Fernando Pires¹, Mohammad Farzaminan², Maria Catrina Paz² e Fernando Monteiro Santos²

¹Instituto Nacional de Investigação Agrária e Veterinária, Portugal

²Instituto Dom Luiz (IDL), Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Campo Grande, Lisboa, Portugal

(*E-mail: ana.paz@iniav.pt)

<https://doi.org/10.19084/rca.18658>

Recebido/received: 2019.10.04

Aceite/accepted: 2020.03.21

RESUMO

O excesso de sais solúveis na solução do solo (salinidade) ou a percentagem de sódio no complexo de troca (sodicidade) são fenómenos que levam à degradação das funções do solo. É essencial monitorizar as áreas de risco de forma a prevenir ou mitigar os processos de salinização e os seus efeitos negativos. Os métodos de indução eletromagnética (EMI), aliados a algoritmos de inversão, têm sido usados para analisar o solo em profundidade, de forma não invasiva, medindo a variação vertical da condutividade elétrica do solo (σ) a partir da sua superfície e permitindo monitorizar grandes áreas de forma eficiente e representativa. Neste trabalho analisaram-se quatro casos de estudo na Lezíria Grande de Vila Franca de Xira. Foram colhidas amostras de solo até uma profundidade de 135 cm para determinação laboratorial da condutividade elétrica do extrato de saturação (EC_e), da percentagem de sódio de troca (ESP) e da razão de adsorção de sódio (SAR). Simultaneamente foram feitas medições de σ com um sensor EMI (EM38). Obteve-se boa correlação entre σ e EC_e , SAR e ESP e foi possível classificar corretamente o solo quanto à salinidade e sodicidade em 88,6% das 89 amostras de solo.

Palavras-chave: salinidade, sodicidade, indução eletromagnética, condutividade elétrica.

ABSTRACT

Salinisation phenomena can lead to degradation of the soil functions. In order to prevent or remediate the excess of soluble salts (salinity) and the percentage of sodium in the soils' exchange complex (sodicity), it is essential to monitor the areas at risk. Electromagnetic induction (EMI) methods coupled with inversion algorithms have been used for non-invasive and in-depth soil analysis determining the vertical variation of the electrical conductivity of bulk soil (σ), monitoring large areas efficiently and representatively. This work was carried out at four case studies in Lezíria Grande of Vila Franca de Xira (Lisbon, Portugal). Soil samples were collected to a depth of 135 cm for laboratory determination of the electrical conductivity of the saturated soil paste extract (EC_e), the exchangeable sodium percentage (ESP) and the sodium adsorption ratio (SAR). Simultaneously, σ measurements were made with an EMI device (EM38). Good correlation was obtained between σ and EC_e , SAR , and ESP . It was possible to correctly classify the soil according to salinity and sodicity in 88,6% in a total of 89 soil samples.

Keywords: salinity, sodicity, electromagnetic induction, electrical conductivity.

[‡] Trabalho publicado no âmbito do Encontro Anual das Ciências do Solo - 2019; Beja, 17 de junho

Os fenômenos de salinização do solo referem-se a diferentes tipos de desequilíbrios de sais, como sejam o excesso de sais solúveis (salinidade) ou a percentagem de Na (sódio) de troca no complexo de troca do solo (sodicidade) (Daliakopoulos *et al.*, 2016). A classificação dos solos como salinos, sódicos ou salino-sódicos é importante uma vez que os impactos negativos variam de acordo com cada uma destas categorias, bem como as estratégias para a sua remediação. Nos solos salinos a pressão osmótica dificulta a absorção de água pelas plantas, levando a *stress* hídrico. Podem ainda resultar em desequilíbrios na absorção de nutrientes ou em toxicidade de alguns elementos. No entanto, os solos salinos mantêm a sua estrutura e permeabilidade e a concentração de sais solúveis pode reduzir-se através da lavagem com água com baixa salinidade e promoção de boa drenagem. Nos solos sódicos existe um excesso de Na de troca e uma baixa concentração de sais solúveis. Esta conjugação leva à expansão e dispersão das argilas e à degradação da estrutura porosa do solo e à formação de camadas de baixa permeabilidade que, entre outros impactos, restringem o crescimento das raízes, a capacidade de retenção de água do solo e potenciam a erosão. Os solos salino-sódicos têm um excesso de Na de troca e de sais solúveis, mas, neste caso, a força eletrostática resultante dos sais dissolvidos na água do solo impede a dispersão das argilas e consequentes impactos (Weil and Bradley, 2017). A remediação dos solos sódicos e salino-sódicos envolve o aumento de Ca (cálcio) disponível para trocar com o Na no complexo de troca do solo. Os métodos podem passar pela promoção da dissolução de Ca existente no solo (por exemplo na calcite, CaCO_3) através de fitoremediação ou bioremediação, ou pela adição de fontes de Ca (como o gesso, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, ou o cloreto de cálcio, CaCl_2). Uma vez na solução do solo o Na forma um sal solúvel (Na_2SO_4) que pode então ser lavado do perfil do solo (Osman, 2018).

Os processos de salinização do solo são frequentemente associados a climas áridos e semiáridos, mas podem ter origem em fenômenos naturais ou antropogénicos, em diferentes regiões climáticas. Assim, a salinização pode ocorrer, por exemplo em áreas costeiras ou estuarinas onde ocorre intrusão salina, ou ainda como resultado de práticas de gestão de rega e drenagem desadequadas. De forma a prevenir ou mitigar os processos de salinização e os seus

impactos, é necessário avaliar e monitorizar a salinidade e sodicidade, bem como os fenômenos na sua origem. A salinidade do solo é geralmente expressa pela condutividade elétrica do extrato de saturação (EC_e), permitindo comparar a concentração de sais entre amostras, independentemente do seu teor de água inicial. A percentagem de sódio de troca (ESP) e a razão de adsorção de sódio (SAR) são parâmetros usados para determinar a sodicidade do solo. A determinação destes parâmetros requer a amostragem do solo e procedimentos laboratoriais, resultando em processos morosos e trabalhosos, dado o grande número de amostras necessárias para caracterizar e monitorizar a salinização do solo.

Os métodos de indução eletromagnética (EMI) têm vindo a ser usados para aumentar a eficiência na monitorização do solo, nomeadamente da salinidade. Os sensores EMI analisam o solo em profundidade, de forma não-invasiva, permitindo estudar grandes áreas em relativamente pouco tempo. Um sensor EMI simples possui duas bobinas que atuam uma como transmissor e a outra como recetor. O transmissor, alimentado por uma corrente alternada a determinada frequência, transmite um campo magnético primário alternado que gera correntes elétricas ao propagar-se no subsolo criando estas, por sua vez, um campo eletromagnético secundário. O recetor deteta o campo primário e secundário, sendo a razão entre ambos proporcional à condutividade elétrica aparente do solo (σ_a). A profundidade de investigação no solo depende da frequência do campo magnético primário, das características do solo e também da distância entre as bobinas e da sua posição em relação ao solo. Na aquisição de dados feita no modo “dipolo vertical”, as bobinas são posicionadas horizontalmente em relação à superfície do solo e no modo “dipolo horizontal” são colocadas verticalmente em relação à superfície do solo (Monteiro Santos, 2004). σ_a é uma propriedade complexa, que resulta da interação entre um conjunto de propriedades do solo como a salinidade, teor de água, textura ou densidade. Assim, σ_a pode ser usado para mapear a variabilidade espacial das propriedades do solo a partir de modelos de correlação previamente estabelecidos e que, geralmente são específicos para uma determinada área com características comuns (Allred *et al.*, 2008; Doolittle and Brevik, 2014; Jayawickreme *et al.*, 2014). Em resultado, σ_a tem sido usado para mapear a salinidade do solo (Bouksila

et al., 2012; Corwin and Lesch, 2005) e outras propriedades como a percentagem de argila, o pH e a capacidade de troca catiónica (Triantafyllis et al., 2009; Huang et al., 2014). No entanto, σ_a representa uma média, ponderada em profundidade, das propriedades do solo e não informa sobre a variação vertical da condutividade elétrica do solo (Doolittle and Brevik, 2014). A obtenção de um conjunto de medições de σ_a com diferentes profundidades de investigação permite usar algoritmos de inversão numérica para obter a variação vertical da condutividade elétrica do solo (σ) (Triantafyllis and Santos, 2010; Monteiro Santos et al., 2011; Farzamian et al., 2015; Jadoon et al., 2017; Moghadas et al., 2017). Após a inversão, é possível analisar a correlação entre σ e as propriedades do solo a cada profundidade. Vários estudos mapearam a variação vertical EC_e a partir de σ (Li et al., 2013; Koganti et al., 2018; Huang et al., 2015), mas a possibilidade de mapear a sodicidade do solo (a partir do ESP ou SAR) ainda não foi completamente explorada. Uma vez que os sais presentes no solo têm influência variável na condutividade elétrica, podem estabelecer-se diferentes correlações entre σ e EC_e e entre σ e ESP ou SAR.

Neste trabalho, usou-se um sensor EMI (EM38) e um algoritmo de inversão para obter σ em quatro casos de estudo na Lezíria Grande de Vila Franca de Xira. Simultaneamente foram colhidas amostras de solo para determinação de EC_e , SAR e ESP até uma profundidade de 135 m. O objetivo do estudo foi analisar o potencial para a determinação da variabilidade vertical da salinidade e sodicidade do solo a partir das medições de EMI.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

O presente estudo foi realizado na Lezíria Grande de Vila Franca de Xira, uma península com cerca de treze mil hectares delimitada pelos rios Tejo, Risco e Sorraia, representada pela área delimitada na Figura 1. É uma área de baixa altitude, plana e alagadiça, com solos formados por deposição de sedimentos de origem marinha e fluvial. A Lezíria Grande de Vila Franca de Xira constitui uma importante área agrícola a nível nacional, com infraestruturas de rega e drenagem e de proteção contra alagamento pelas águas estuarinas. A parte sul da Lezíria é ocupada

principalmente por pastagens de sequeiro, devido à salinidade mais elevada destes solos. Os solos são tipicamente argilosos, classificados como Fluvisols no norte da península e como Solonchaks no sul, de acordo com Fischer et al. (2012) e a classificação WRBSR (IUSS Working Group WRB, 2015). O clima é temperado com verões quentes e secos, de acordo com a classificação de Köppen. As médias climáticas para o período de 1971-2000 mostram uma média anual de chuva de 716 mm, com um máximo em novembro (127,6 mm) e um mínimo em julho (2 mm), e com uma temperatura máxima média de 28,8 °C (Agosto), e uma temperatura mínima média 6,7 °C (Janeiro e Fevereiro). O índice de aridez médio para este período foi de 0,5 (Portal do Clima, s.d.). O índice de aridez é a razão entre a precipitação e a evapotranspiração potencial, correspondendo valores entre 0,5 (inclusive) e 0,65, a um clima de tipo sub-húmido seco.

Foram selecionados quatro locais na Lezíria ao longo da direção norte-sul, com conhecido gradiente crescente de salinidade. Os quatro locais estão indicados na Figura 1 com os números de 1 a 4. Nos locais 1 a 3 fazem-se rotações anuais com culturas regadas durante o período de primavera-verão e de azevém (*Lolium multiflorum*) no outono-inverno, sendo o solo geralmente mobilizado anualmente. Durante o estudo (2017) no local 1 estava instalado tomate com rega gota-a-gota e nos locais 2 e 3 cultivou-se milho com rega por aspersão com *pivot* central. A água de rega é de boa qualidade ($EC < 0,5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ e $SAR < 1 \text{ mmol}_c\cdot\text{L}^{-1}$). O local 4 tem uma pastagem permanente de sequeiro.



Figura 1 - A área de estudo da Lezíria Grande de Vila Franca de Xira (Lisboa, Portugal) e os locais 1 - 4 onde as secções de EMI foram realizadas.

É conhecido um gradiente crescente de salinidade do solo de norte para sul da península. Este gradiente parece dever-se à maior influência das águas oceânicas nas águas subterrâneas na parte sul da ilha, devido à maior proximidade ao estuário. As projeções dos vários cenários de alterações climáticas para esta zona apontam para um decréscimo da precipitação, o aumento da temperatura média e a subida do nível da água do mar. Estes fatores podem agravar os processos causadores de salinização nesta área (subida de águas subterrâneas salinas, aumento da evapotranspiração e diminuição da capacidade de lavagem de sais pela chuva), bem como pode levar à degradação da água de rega, recolhida do Tejo na parte setentrional da península. Em anos de seca, os caudais dos rios Tejo e Sorraia diminuem levando ao avanço para montante da água salina do estuário, aumentando a salinidade da água na zona de captação.

Medições de EMI e amostragem do solo

As medições de EMI foram realizadas com o sensor EM38 (Geonics Ltd, Mississauga, Canadá). Em cada local, realizaram-se medições ao longo de uma seção de 100 m de comprimento. O EM38 tem apenas 1 par de bobinas (transmissor e recetor), assim, de forma a obter um conjunto de medições de σ_a que permita a inversão numérica para determinação da variação vertical da condutividade elétrica do solo (σ), foram realizadas quatro passagens com o sensor ao longo das seções. Assim, mediu-se σ_a em dois modos com o sensor orientado verticalmente e horizontalmente em relação ao solo (σ_{a_v} e σ_{a_h}) e a duas alturas da superfície do solo. O primeiro par de medições foi feito a uma altura de 0,15 m, o que permite investigar a profundidades teóricas de 0,6 m ($\sigma_{a_h0,15}$) e 1,35 m ($\sigma_{a_v0,15}$). O segundo par de medições foi feito a uma altura de 0,4 m, permitindo profundidades teóricas de 0,35 m ($\sigma_{a_h0,4}$) e 1,1 m ($\sigma_{a_v0,4}$). As medições foram feitas em modo contínuo usando um carrinho para fixação do EM38 em cada uma das posições e usando um GPS para registo da localização.

Simultaneamente foram colhidas amostras de solo em 4 a 5 pontos ao longo da secção. Em cada ponto foram colhidas amostras em 5 profundidades: 0-0,3 m, 0,3-0,6 m, 0,6-0,9 m, 0,9-1,2 m e 1,2-1,5 m. No total, foram recolhidas 89 amostras de solo.

Inversão de σ_a

O conjunto de medições de EMI ($\sigma_{a_h0,15}$, $\sigma_{a_v0,15}$, $\sigma_{a_h0,4}$ e $\sigma_{a_v0,4}$) foi usado para obter a distribuição da condutividade elétrica do solo (σ) usando o algoritmo de inversão descrito detalhadamente em Monteiro Santos (2004), Triantafilis e Santos (2010) e Monteiro Santos *et al.* (2011). Este é um algoritmo de inversão não-linear, em que a função-objetivo (neste caso a diferença entre os valores de condutividade elétrica observados e os correspondentes à resposta do modelo) é minimizada iterativamente, usando o método dos mínimos quadrados com constrangimentos. A resposta do modelo (derivado das leis de Maxwell para a propagação eletromagnética) é calculada usando uma aproximação linear e os constrangimentos correspondem a uma regularização *Occam*, através da qual se procuram as respostas com variações suaves nos valores de σ . Este algoritmo tem sido aplicado com sucesso na determinação de propriedades do solo quando predomina a variação vertical da condutividade elétrica. A otimização dos parâmetros do algoritmo de inversão para a área de estudo foi apresentada por Farzamian *et al.* (2019), onde os autores concluem que os parâmetros de inversão podem ser utilizados para determinação de σ em diferentes locais na área de estudo.

Determinações laboratoriais

As amostras de solo foram analisadas em laboratório para a determinação de EC_e , SAR e ESP . EC_e foi determinado com um condutivímetro (WTW 1C20-0211 inoLab) num extrato da pasta saturada de solo, recolhido em funis sob sucção de acordo com os métodos descritos por Richards (1954). O SAR mede a razão entre a concentração de Na solúvel relativamente à concentração de Ca e Mg solúveis, de acordo com a equação (1):

$$SAR = \frac{[Na^+]}{\sqrt{\frac{[Ca^{2+}] + [Mg^{2+}]}{2}}} [(mmol \cdot L^{-1})^{0.5}] \quad (1)$$

onde $[Na^+]$, $[Ca^{2+}]$, and $[Mg^{2+}]$ são as concentrações dos cationes solúveis medidos no extrato da pasta saturada de solo através de espectrofotometria

de absorção atômica (Thermo Scientific iCE3000). *ESP* é a percentagem de Na no complexo de troca, sendo a razão entre a concentração de Na de troca e a capacidade de troca catiónica do solo (CTC), de acordo com a equação (2):

$$ESP = \frac{[Na^+]}{CTC} * 100 \quad [\%] \quad (2)$$

onde é a concentração do Na de troca, determinada através do método de Bascomb a pH 8,1, também usado para a determinação da CTC, de acordo com a norma ISO 13536:1995.

Classificação do solo quanto à salinidade e sodicidade

A classificação dos solos quanto à salinidade e sodicidade foi proposta por Richards (1954) a partir de um limite de $EC_e \geq 4 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ para solos salinos e $ESP \geq 15\%$ para solos sódicos. Estes valores foram apresentados como indicativos, mas continuam a ser geralmente seguidos. Em algumas regiões adotaram-se valores limite inferiores para classificar os solos como sódicos, como é o caso da Austrália em que os solos são considerados sódicos quando $ESP \geq 6\%$. Com base na relação entre *ESP* e *SAR* apresentada por Richards (1954), pode ainda usar-se *SAR* para a classificação, de acordo com a Figura 2.

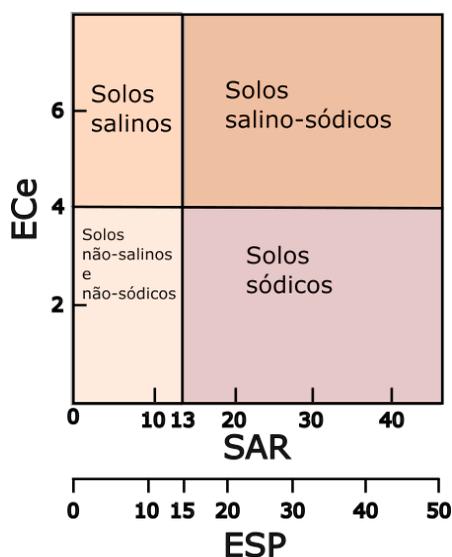


Figure 2 - Classificação do solo quanto à salinidade e sodicidade tendo em conta os valores de EC_e , *SAR* e *ESP* (aptado de Weil and Bradley, 2017).

Determinação da salinidade e sodicidade

A correlação entre σ e EC_e , *SAR* e *ESP* foi analisada de forma a avaliar o potencial para determinação da salinidade e sodicidade do solo. Desenvolveram-se modelos de correlação entre σ e as três propriedades. O desempenho destes modelos para estimar EC_e , *SAR* e *ESP* foi estudada através da validação cruzada usando o método "leave-one-out", em que cada uma das observações é retirada do conjunto de calibração e o modelo obtido é usado para determinar o valor observação que não foi incluída. Este processo repete-se *n* vezes e o erro quadrático médio da validação (*RMSEP*) é calculado de acordo com a equação (3):

$$RMSEP = \sqrt{\frac{\sum(\text{valores medidos} - \text{valores estimados})^2}{n}} \quad (3)$$

Os modelos de correlação foram usados para obter os mapas 2-D da classificação do solo quanto à salinidade e sodicidade para as seções de EMI medidas.

RESULTADOS

Propriedades do solo

A Figura 3 mostra a média e o desvio padrão das propriedades do solo em cada um dos quatro locais. A Figura 3 mostra que os locais 1 e 2 são não-salinos ao longo de todo o perfil ($EC_e < 2 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$). Os locais 3 e 4 são não-salinos à superfície, mas EC_e aumenta marcadamente com a profundidade atingindo $12 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ no local 3 e $30 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ no local 4. Esta variação salinidade de norte para sul da península devido à maior proximidade do estuário. O aumento de EC_e em profundidade nos locais 3 e 4 poderá ser resultado da influência da toalha freática salina. A baixa salinidade no local 1 é propícia ao cultivo de tomate, cuja sensibilidade à salinidade é elevada. No local 3 os níveis de salinidade registados podem comprometer a cultura do milho, cujo limite superior de tolerância é de $4 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ (Weil and Bradley, 2017). A superfície do local 4 tem EC_e inferior à do local 3, o que pode ser resultado da adição de sais com a água de rega e/ou com piores condições de lavagem dos sais superficiais no local 3.

Em relação ao SAR, a figura mostra que tem um padrão de variação idêntico ao de EC_e entre os locais e, em cada um deles, com a profundidade. Nos locais 1 e 2 SAR está abaixo de 13 ($\text{mmol}_c \cdot \text{L}^{-1}$)^{0.5} enquanto que em 3 e 4 o SAR ultrapassa aquele valor nas camadas mais profundas. Em relação a ESP, a figura mostra que o local 1 é não-sódico ($ESP < 15\%$),

enquanto 2, 3 e 4 mostram $ESP > 15\%$ nas camadas mais profundas. O local 3 tem valores de ESP superiores aos outros locais ao longo de todo o perfil. Estes resultados mostram que o local 1 é não-salino e não-sódico ao longo de todo o perfil, o local 2 classifica-se como sódico nas duas camadas mais profundas devido ao elevado teor de Na de troca ($ESP > 15\%$), enquanto os locais 3 e 4 são predominantemente salino-sódicos abaixo da superfície. A classificação do local 2 como sódico é relevante, chamando a atenção para a necessidade urgente de remediação de forma a mitigar a degradação do solo nesta parcela.

Determinação de EC_e , ESP e SAR

A Figura 4 mostra os modelos de correlação entre EC_e , SAR, ESP e σ (coluna da esquerda) e os resultados da validação (coluna da direita). Em relação à correlação entre as variáveis, estabeleceram-se modelos de correlação linear entre σ e EC_e e de correlação logarítmica entre σ e SAR e entre σ e ESP. Os modelos apresentam um coeficiente de determinação (R^2) significativo nos locais 2, 3 e 4, indicando que aquelas propriedades podem ser determinadas a partir de σ . No local 1, não existe correlação entre σ e EC_e e entre σ e SAR. Isto deve-se ao facto de estas propriedades terem valores baixos e variações mínimas, acabando σ por ser dominado por outras propriedades do solo neste local (como por exemplo, o teor de água). No entanto, os valores de σ no local 1 mostraram-se uniformemente baixos, o que permitiu usar os modelos para determinar corretamente EC_e e SAR a partir de σ . O RMSEP calculado para o total de observações dos quatro locais foi de 2,03 $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ para EC_e , 4,68 ($\text{mmol}_c \cdot \text{L}^{-1}$)^{0.5} para o SAR e 3,83 % para o ESP. Estes resultados mostram que é possível determinar estas propriedades com erros de determinação aceitáveis, dentro das condições deste estudo, que incluem variação do teor de água e da textura dos solos estudados.

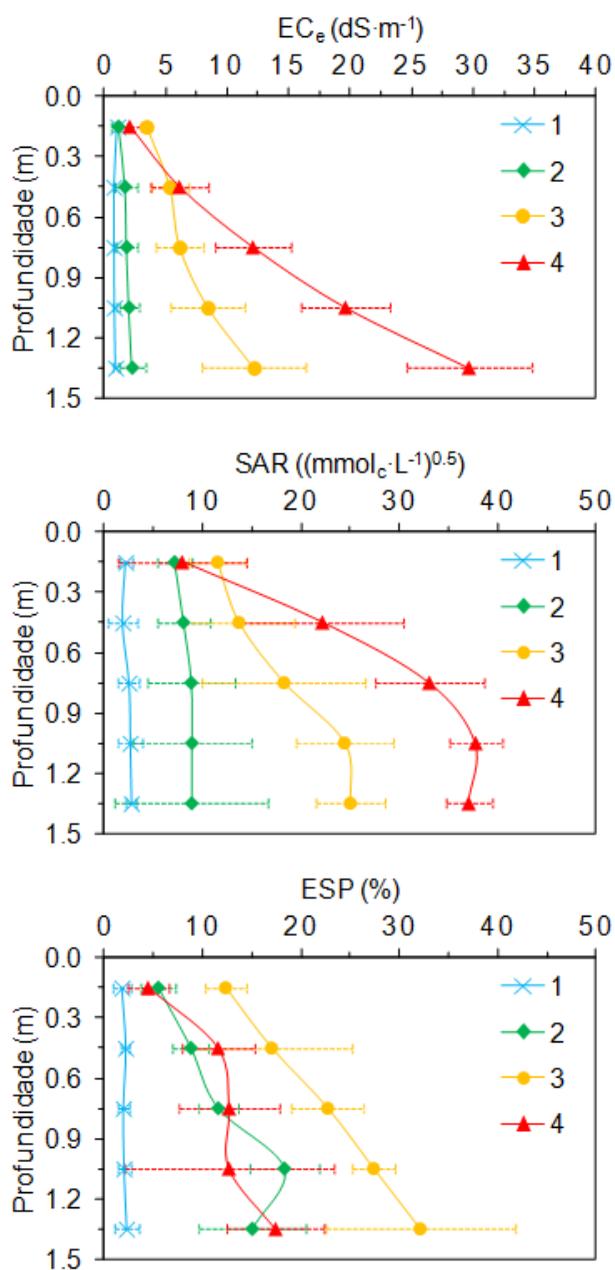


Figure 3 - Classificação do solo quanto à salinidade e sodicidade tendo em conta os valores de EC_e , SAR e ESP (aptado de Weil and Bradley, 2017).

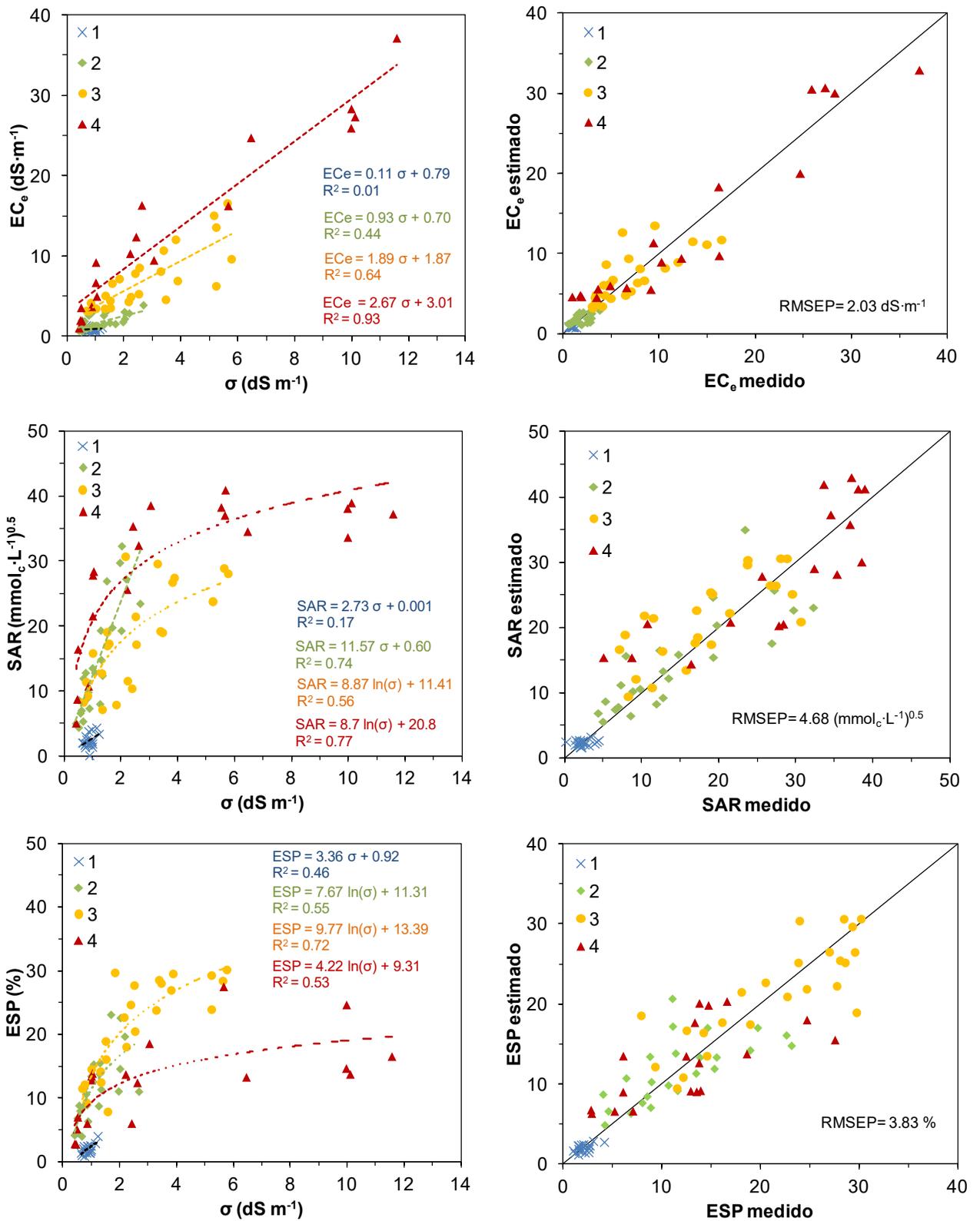


Figura 4 - Modelos de correlação entre EC_e , SAR, ESP e σ (coluna da esquerda) e os resultados da validação (coluna da direita).

Mapa 2-D da salinidade e sodicidade

O solo foi classificado quanto à salinidade e sodicidade usando os valores de EC_e , SAR e ESP determinados a partir de σ . A Figura 5 mostra o mapa 2-D para as seções medidas em cada um dos quatro locais. Os círculos correspondem à classificação das amostras de solo em que EC_e , SAR , e ESP foram determinados em laboratório. Das 89 amostras, 88,6% é corretamente classificado a partir das medições de σ (apresentada pela cor de fundo). A figura mostra que os erros de classificação ocorrem principalmente nas zonas em que ocorre uma mudança na classificação. Nestes casos, os erros

podem dever-se à variabilidade dentro de cada camada, uma vez que a amostra é recolhida à profundidade média de cada camada. Pode também ser resultado dos efeitos de suavização de picos entre valores vizinhos que é inerente ao processo de inversão numérica. Outra possibilidade refere-se ainda ao número de medições de σ_a poder não ser suficiente para obter uma inversão precisa quando existem gradientes de variação vertical elevados. Neste caso, a precisão poderia ser aumentada medindo σ_a a mais distâncias do solo, de forma a obter resultados de inversão mais precisos nos casos em que existam grandes variações de σ em pequenos intervalos.

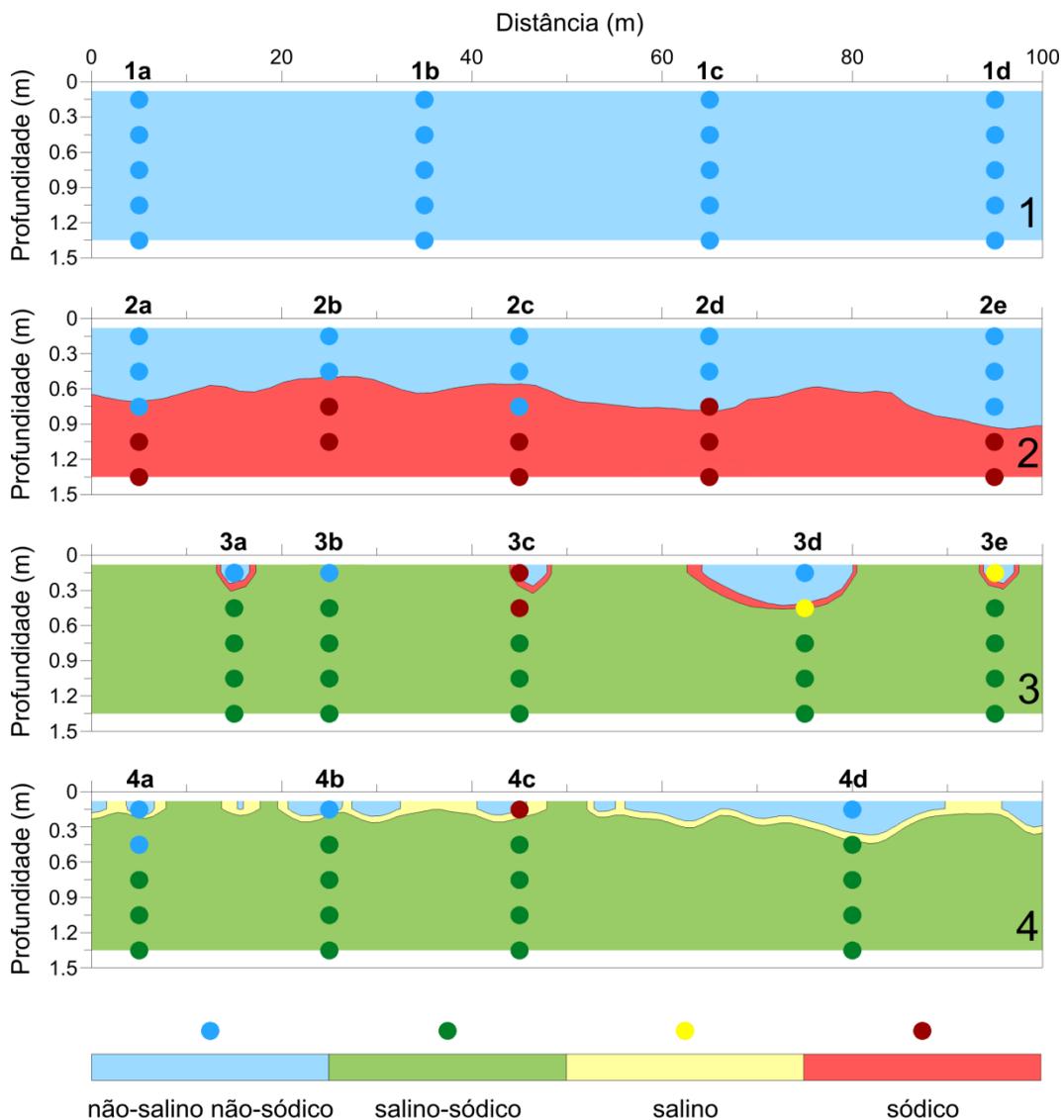


Figura 5 - Mapa 2-D da classificação do solo quanto à salinidade e sodicidade determinada a partir de σ (cor de fundo). Os círculos representam a classificação obtida para as amostras em que EC_e , SAR e ESP foram determinados em laboratório.

CONCLUSÕES

Neste estudo, um sensor de EMI (EM38) e um algoritmo de inversão foram usados para obter σ até uma profundidade de 1,35 m em quatro locais numa área agrícola, sujeita a processos de salinização podendo concluir-se:

- Encontraram-se correlações significativas entre EC_e e σ (linear), entre SAR e σ e entre ESP e σ (logarítmicas). Os resultados da validação cruzada destes modelos mostram um $RMSEP$ de 2,03 $dS\cdot m^{-1}$ para EC_e , 4,68 $(mmol_c\cdot L^{-1})^{0,5}$ para o SAR e 3,83 % para o ESP .
- Os solos podem classificar-se quanto à salinidade e sodicidade usando os modelos obtidos para determinação de EC_e , SAR e ESP a partir de σ , tendo sido 88,6% das 89 observações classificadas corretamente.

Os resultados deste estudo mostram que pode classificar-se o solo quanto à salinidade e sodicidade a partir de σ , obtida a partir da inversão numérica de quatro medições de σ_a com um instrumento de EMI de apenas 1 sensor. Assim, a salinidade e sodicidade do solo podem monitorizar-se em profundidade utilizando um método não-invasivo, relativamente económico e eficiente, dada a rapidez com que é possível medir e obter resultados para grandes áreas. Este resultado é importante pois facilita a monitorização do solo em zonas de risco, para adoção de práticas de prevenção e mitigação dos problemas de salinização, de forma a conservar e melhorar as funções do solo.

AGRADECIMENTOS

Este estudo foi realizado no âmbito dos seguintes projetos financiados pela FCT: ARIMNET2/0004/2015 e ARIMNET2/0005/2015 e FCT/UID/GEO/50019/2019.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allred, B.; Daniels, J.J. & Ehsani, M.R. (2008) – *Handbook of Agricultural Geophysics*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420019353>
- Bouksila, F.; Persson, M.; Bahri, A. & Berndtsson, R. (2012) – Electromagnetic induction prediction of soil salinity and groundwater properties in a Tunisian Saharan oasis. *Hydrological Sciences Journal*, vol. 57, n. 7, p. 1473–1486. <https://doi.org/10.1080/02626667.2012.717701>
- Corwin, D.L. & Lesch, S.M. (2005) – Characterizing soil spatial variability with apparent soil electrical conductivity: I. Survey protocols. *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 46, n. 1-3, p. 103–133. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2004.11.002>
- Doolittle, J.A. & Brevik, E.C. (2014) – The use of electromagnetic induction techniques in soils studies. *Geoderma*, vol. 223–225, p. 33–45. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.01.027>
- Farzamian, M.; Monteiro Santos, F.A. & Khalil, M.A. (2015) – Estimation of unsaturated hydraulic parameters in sandstone using electrical resistivity tomography under a water injection test. *Journal of Applied Geophysics*, vol. 121, p. 71–83. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2015.07.014>
- Farzamian, M.; Paz, M.C.; Paz, A.M.; Castanheira, N.L.; Gonçalves, M.C.; Santos, F.A.M. & Triantafilis, J. (2019) – Mapping soil salinity using electromagnetic conductivity imaging—A comparison of regional and location-specific calibrations. *Land Degradation & Development*, vol. 30, n. 12, p. 1393–1406. <https://doi.org/10.1002/ldr.3317>
- Fischer, G.; Nachtergaele, F.O.; Prieler, S.; Teixeira, E.; Toth, G.; van Velthuizen, H.; Verelst, L. & Wiberg, D. (2012) – Global Agro-ecological Zones (GAEZ v3.0)- Model Documentation [Online] URL: [cit. 2018.12.17]. <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/>
- Huang, J.; Lark, R.M.; Robinson, D.A.; Lebron, I.; Keith, A.M.; Rawlins, B.; Tye, A.; Kuras, O.; Raines, M. & Triantafilis, J. (2014) – Scope to predict soil properties at within-field scale from small samples using proximally sensed γ -ray spectrometer and EM induction data. *Geoderma*, vol. 232–234, p. 69–80. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.04.031>

- Huang, J.; Mokhtari, A.R.; Cohen, D.R.; Santos, F.A.M. & Triantafilis, J. (2015) – Modelling soil salinity across a gilgai landscape by inversion of EM38 and EM31 data. *European Journal of Soil Science*, vol. 66, n. 5, p. 951–960. <https://doi.org/10.1111/ejss.12278>
- IUSS Working Group WRB (2015) – *World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome.
- Jadoon, K.Z.; Altaf, M.U.; McCabe, M.F.; Hoteit, I.; Muhammad, N.; Moghadas, D. & Weihermüller, L. (2017) – Inferring soil salinity in a drip irrigation system from multi-configuration EMI measurements using adaptive Markov chain Monte Carlo. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 21, p. 5375–5383. <https://doi.org/10.5194/hess-21-5375-2017>
- Jayawickreme, D.H.; Jobbágy, E.G. & Jackson, R.B. (2014) – Geophysical subsurface imaging for ecological applications. *New Phytologist*, vol. 201, n. 4, p. 1170–1175. <https://doi.org/10.1111/nph.12619>
- Koganti, T.; Narjary, B.; Zare, E.; Pathan, A.L.; Huang, J. & Triantafilis, J. (2018) – Quantitative mapping of soil salinity using the DUALEM-21S instrument and EM inversion software. *Land Degradation & Development*, vol. 29, n. 6, p. 1768–1781. <https://doi.org/10.1002/ldr.2973>
- Li, H.Y.; Shi, Z.; Webster, R. & Triantafilis, J. (2013) – Mapping the three-dimensional variation of soil salinity in a rice-paddy soil. *Geoderma*, vol. 195–196, p. 31–41. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.11.005>
- Moghadas, D.; Jadoon, K.Z. & McCabe, M. (2017) – Spatiotemporal monitoring of soil water content profiles in an irrigated field using probabilistic inversion of time-lapse EMI data. *Advances in Water Resources*, vol. 110, p. 238–248. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.10.019>
- Monteiro Santos, F.; Triantafilis, J. & Bruzgulis, K. (2011) – A spatially constrained 1D inversion algorithm for quasi-3D conductivity imaging: Application to DUALEM-421 data collected in a riverine plain. *Geophysics*, vol. 76, n. 2, p. B43–B53. <https://doi.org/10.1190/1.3537834>
- Monteiro Santos, F.A. (2004) – 1-D laterally constrained inversion of EM34 profiling data. *Journal of Applied Geophysics*, vol. 56, n. 2, p. 123–134. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2004.04.005>
- Osman, K.T. (2018) – Saline and Sodic Soils. In: Osman, K.T. (Ed.) – *Management of Soil Problems*. Springer International Publishing, p. 255–298. https://doi.org/10.1007/978-3-319-75527-4_10
- Portal do Clima (s.d.) – [cit. 2018.12.17]. <http://portaldoclima.pt/pt/>
- Richards, L.A. (Ed.) (1954) – *Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils*. Agricultural Handbook. USDA.
- Triantafilis, J.; Lesch, S.; Lau Lau, K. & Buchanan, S. (2009) – Field level digital soil mapping of cation exchange capacity using electromagnetic induction and a hierarchical spatial regression model. *Australian Journal of Soil Research*, vol. 47, n. 7, p. 651–663. <https://doi.org/10.1071/SR08240>
- Triantafilis, J. & Santos, F.A.M. (2010) – Resolving the spatial distribution of the true electrical conductivity with depth using EM38 and EM31 signal data and a laterally constrained inversion model. *Australian Journal of Soil Research*, vol. 48, n. 5, p. 434–446. <https://doi.org/10.1071/SR09149>
- Weil, R. & Bradley, N. (2017) – *The Nature and Properties of Soils*, 15th ed. Pearson.