



**MAPEAMENTO DIGITAL
DO TEOR DE ARGILA
DO SOLO, COMBINANDO
LEVANTAMENTOS
ELETROMAGNÉTICOS
NÃO INVASIVOS
COM INFORMAÇÕES
DE SONDA GENS**

Apresenta-se o mapeamento das propriedades do solo, no perímetro de rega do Roxo, utilizando métodos geofísicos de indução eletromagnética (EMI). Este método permite avaliar a variação espacial das propriedades do solo de um modo expedito, não invasivo e *in situ*, cobrindo grandes áreas em menos tempo e com menor custo.



Introdução

O conhecimento sobre a distribuição espacial do teor de argila do solo e da capacidade de troca catiónica (CTC) são indicadores importantes para a gestão do solo e da água na agricultura. A determinação daquelas propriedades do solo pelos métodos clássicos é realizada através de análises laboratoriais em amostras de solo colhidas a diferentes profundidades com uma sonda. No entanto, devido ao custo e morosidade da colheita das amostras e respetivas análises laboratoriais, os métodos clássicos são geralmente aplicados a pequenas áreas, podendo não ser representativos da variabilidade das propriedades do solo em grandes áreas necessárias à gestão do solo agrícola. Técnicas geofísicas como a indução eletromagnética (EMI) apresentam enormes vantagens em relação à amostragem clássica, pois permitem avaliar o padrão espacial da propriedade de um modo expedito, não invasivo e *in situ*, cobrindo grandes áreas em menos tempo e com menor custo.

No âmbito do projeto SOIL4EVER e na área do perímetro de rega do Roxo no Alentejo, Portugal, realizámos medições EMI com o equipamento DUALEM-21 em várias unidades-solo. Também recolhemos amostras de solo para avaliar o potencial de utilização desta metodologia no mapeamento da distribuição espacial de propriedades físicas do solo (por exemplo, teores de argila e de areia) e de propriedades químicas [por exemplo, da capacidade de troca catiónica (CTC) e da condutividade elétrica medida no extrato de saturação do solo (ECe)]. Os dados EMI foram tratados e modelados para inferir a distribuição da condutividade elétrica do solo (σ) com a profundidade, usando a metodologia descrita em Farzamian *et al.* (2019). Nas amostras de solo recolhidas, determinou-se no laboratório de solos do INIAV a textura do solo, ECe e CTC. Finalmente, avaliamos a possibilidade de estabelecer uma regressão linear simples entre σ e o teor de argila e de areia, ECe e CTC do solo nos vários locais de amostragem até uma profundidade de 0,80 m.

Mohammad Farzamian¹, Maria da Conceição Gonçalves¹, Nádia Castanheira¹, Ana Marta Paz¹, Francisco J. Martínez-Moreno², Fernando A. Monteiro Santos², Carlos Alexandre³, Tiago B. Ramos⁴, Ana Oliveira⁴

¹ Instituto Nacional de Investigação Agrária e Veterinária



² Instituto Dom Luiz



³ Universidade de Évora



⁴ Instituto Superior Técnico



Quadro 1 – Culturas e famílias de solo nos locais selecionados no âmbito do projeto SOIL4EVER

Local n.º	Cultura	Variedade	Solos (famílias)
1	Amendoal	Monterey	Sr*
2	Amendoal	Monterey	Sr*
3	Olival intensivo	Arbequina	Sr
4	Olival intensivo	Cobrançosa	Sr
5	Olival intensivo	Picual	Vc
6	Citrinos – Laranjas	Fukumoto	Pag
7	Citrinos – Clementinas	Clementina Oronules	Pag
8	Citrinos – Tangerinas	Tangerina Setubalense	Pag
9	Romã	Wonderful	Ps
10	Olival superintensivo	Arbequina	Cpv

Legenda abreviada das famílias de solos:

Sr* – Solos Mediterrâneos Vermelhos com materiais lateríticos (pedregosos e moderadamente drenados);

Sr – Solos Mediterrâneos Vermelhos (pedregosos e bem drenados nas camadas superficiais);

Vc – Solos Calcários Vermelhos (com carbonatos e, geralmente, bem drenados);

Pag – Solos Mediterrâneos Pardos, para Solos Hidromórficos (com contraste textural e mal drenados);

Ps – Solos Hidromórficos, Planossolos (com forte contraste textural; muito mal drenados);

Cpv – Barros Castanho Avermelhados, (boa fertilidade, carbonatos a pouca profundidade, drenagem moderada).



Figura 1 – Medição da ECa do solo com o equipamento DUALEM-21 no local 8 (Citrinos – Tangerinas) no perímetro de rega do Roxo, Portugal.

Casos de estudo

No âmbito do projeto SOIL4EVER, selecionaram-se 10 locais com várias culturas regadas (rega gota a gota) e diferentes tipos de solo. Os solos foram classificados segundo a classificação portuguesa (Cardoso, 1974) (Quadro 1). A condutividade elétrica média da água de rega durante o período deste estudo (2019) foi de 0,72 dS/m. Para este trabalho, foram usados os locais 6, 7 e 8 para avaliar o potencial de utilização dos métodos geofísicos EMI no mapeamento da distribuição espacial das propriedades de solo já referidas.

Mapeamento digital do solo com métodos geofísicos (EMI)

Os métodos geofísicos de indução eletromagnética (EMI) determinam a condutividade elétrica aparente do solo (ECa), que representa uma média ponderada da condutividade elétrica num volume de solo. Esta metodologia pode ser aplicada em profundidade e em grandes áreas de modo não invasivo, de forma rápida e eficiente. Os dados obtidos da ECa são depois tratados por modelação inversa (Paz *et al.*, 2020), dando origem à distribuição vertical da condutividade elétrica do meio, neste caso o solo (σ). Os valores de σ obtidos são correlacionados com as propriedades do solo acima mencionadas. Neste trabalho, os métodos geofísicos de indução eletromagnética (EMI) foram aplicados a alguns dos locais (Locais 6, 7 e 8) utilizando o equipamento DUALEM-21 (Figura 1).

A partir dos dados obtidos da ECa com o equipamento DUALEM-21 realizaram-se mapas de condutividade elétrica do solo (σ). Tanto a ECa como a resultante σ , são influenciadas por algumas propriedades do solo, como o teor de argila, o teor de água no solo e a presença ou não de sais na solução do solo. Na Figura 2 apresenta-se um exemplo dos resultados do mapeamento da condutividade elétrica para as várias culturas de citrinos nos locais 6, 7 e 8, até 1 m de profundidade. Os mapas de σ desta figura mostram grande variabilidade espacial da condutividade elétrica do solo nas camadas superiores, desde valores inferiores a 20 mS/m a valores superiores a 150 mS/m. Es-

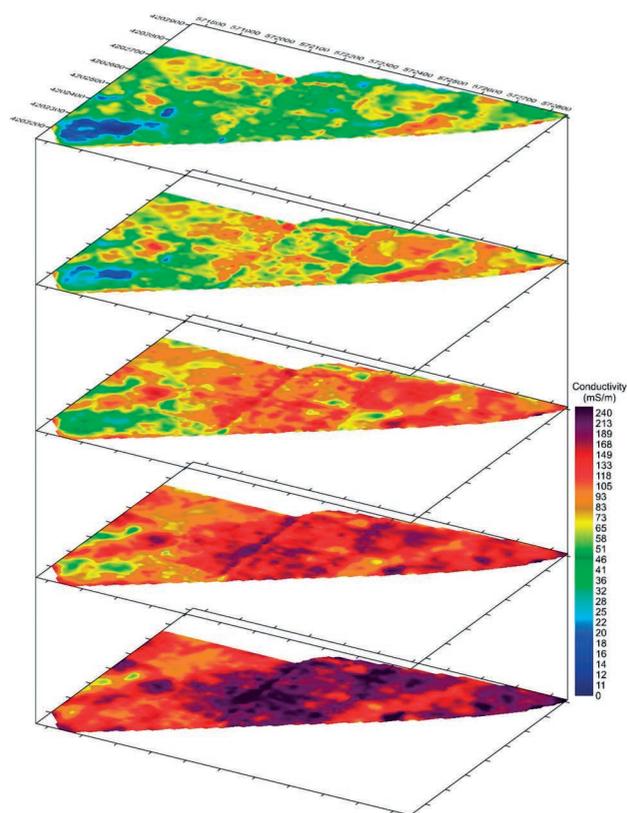


Figura 2 – Mapa da condutividade elétrica do solo (σ) obtido para as várias culturas de citrinos (engloba os locais 6, 7 e 8) a 0,2, 0,4, 0,6, 0,8 e 1 m de profundidade (dS/m), em dezembro de 2019 no perímetro de rega do Roxo, Portugal.

ta grande variabilidade espacial da condutividade elétrica indica uma grande variabilidade em outras propriedades do solo. A condutividade elétrica do solo aumenta com a profundidade nestes campos, sendo o máximo observado na camada mais profunda.

Amostragem do solo e análises laboratoriais para a calibração

Nos Locais 6, 7 e 8 selecionámos 13 pontos de referência para a amostragem do solo e posterior determinação da textura do solo, ECe e CTC. Os pontos de referência foram escolhidos com base na variabilidade espacial de σ . Em cada ponto colheram-se amostras de solo, com incrementos de profundidade de 0,20 m, até uma profundidade de 0,60 ou 0,80 m. Estas amostras foram usadas para

Quadro 2 – Estatísticas das propriedades do solo nos pontos de referência selecionados nos locais 6, 7 e 8 (várias culturas de citrinos) no perímetro de rega do Roxo, Portugal

Parâmetro	N.º de amostras	Mínimo	Máximo	Média	CV [%]*
EC _e [dS m ⁻¹]	24	0,16	1,95	0,71	63,2
Argila (%)	43	7,23	50,57	26,49	47,2
Areia (%)	43	28,14	84,00	60,06	26,6
Limo (%)	43	8,16	33,92	13,64	43,7
CTC [cmol(c)/kg]	18	7,94	39,77	21,02	48,5

*CV = Coeficiente de variação

desenvolver um modelo de calibração entre σ e as propriedades do solo. A análise textural foi feita em todas as amostras, mas, até ao momento, só em algumas amostras foi analisada a ECE e CTC. O Quadro 2 indica algumas estatísticas das propriedades do solo nos pontos de referência.

Calibração e validação do modelo

Desenvolveu-se um modelo de regressão linear entre os valores de σ e os valores das propriedades do solo teor de argila, teor de areia, ECE e CTC (Quadro 2) para: (i) avaliar quais as propriedades que mostram uma forte correlação com as medições EMI e (ii) prever essas propriedades a diferentes profundidades nos locais em que não temos amostra de solo. Os resultados das correlações são apresentados na Figura 3. Não se verificou existir correlação entre σ e ECE. Atribuímos este resultado aos baixos valores de ECE encontrados (ECE média de 0,71 dS/m com um valor máximo inferior a 2 dS/m) e a uma grande variabilidade da textura do solo (Quadro 2). Por outro lado, observamos uma correlação elevada entre σ e o teor de areia, o teor de argila e a CTC, com valores de R² de 0,69, 0,59 e 0,85, respetivamente. Estes resultados sugerem que o teor de argila e a CTC são os parâmetros que mais influenciam as medições EMI neste campo (estes dois parâmetros estão por sua vez correlacionados entre si, dependendo a CTC do teor e tipo de argila do solo). Pelo contrário, o teor de areia apresenta uma correlação negativa com os resultados de EMI, indicando que as zonas com menor condutividade apresentaram um teor

de areia mais alto. As equações de regressão linear obtidas poderão ser utilizadas para converter resultados obtidos com o EMI (mapas da condutividade elétrica do solo) em mapas dos teores de areia e argila no solo. Para a CTC, são necessárias mais amostras para se obter uma equação de regressão linear (só foram usadas 18 medições). As equações obtidas para o teor de areia e argila são: areia (%) = $-0,67\sigma + 83,55$ e argila (%) = $0,49\sigma + 9,45$, respetivamente. Estas equações foram usadas para mapear o teor de areia e argila nos casos de estudo das culturas de citrinos.

Mapeamento das propriedades do solo

Usando as equações de regressão obtidas, e indicadas na Figura 3, convertimos o mapa de σ (Figura 2) nos mapas do teor de argila e de areia do solo (Figura 4). A Figura 4 mostra um exemplo dos resultados obtidos para a profundidade de 20 cm. As amostragens a esta profundidade mostram um teor de areia elevado, com um valor médio de 64,5%, e um teor de argila relativamente baixo, com uma média de 23,5%. No entanto, a variabilidade espacial daquelas propriedades pode ser detetada em algumas áreas nas partes norte e leste do campo, com teores de argila relativamente maiores (mais de 40%) e menores teores de areia (menos que 50%). Em contraste, o sudoeste da área de estudo tem menor teor de argila, descendo abaixo de 10%, acompanhado por um teor de areia de mais de 80%.

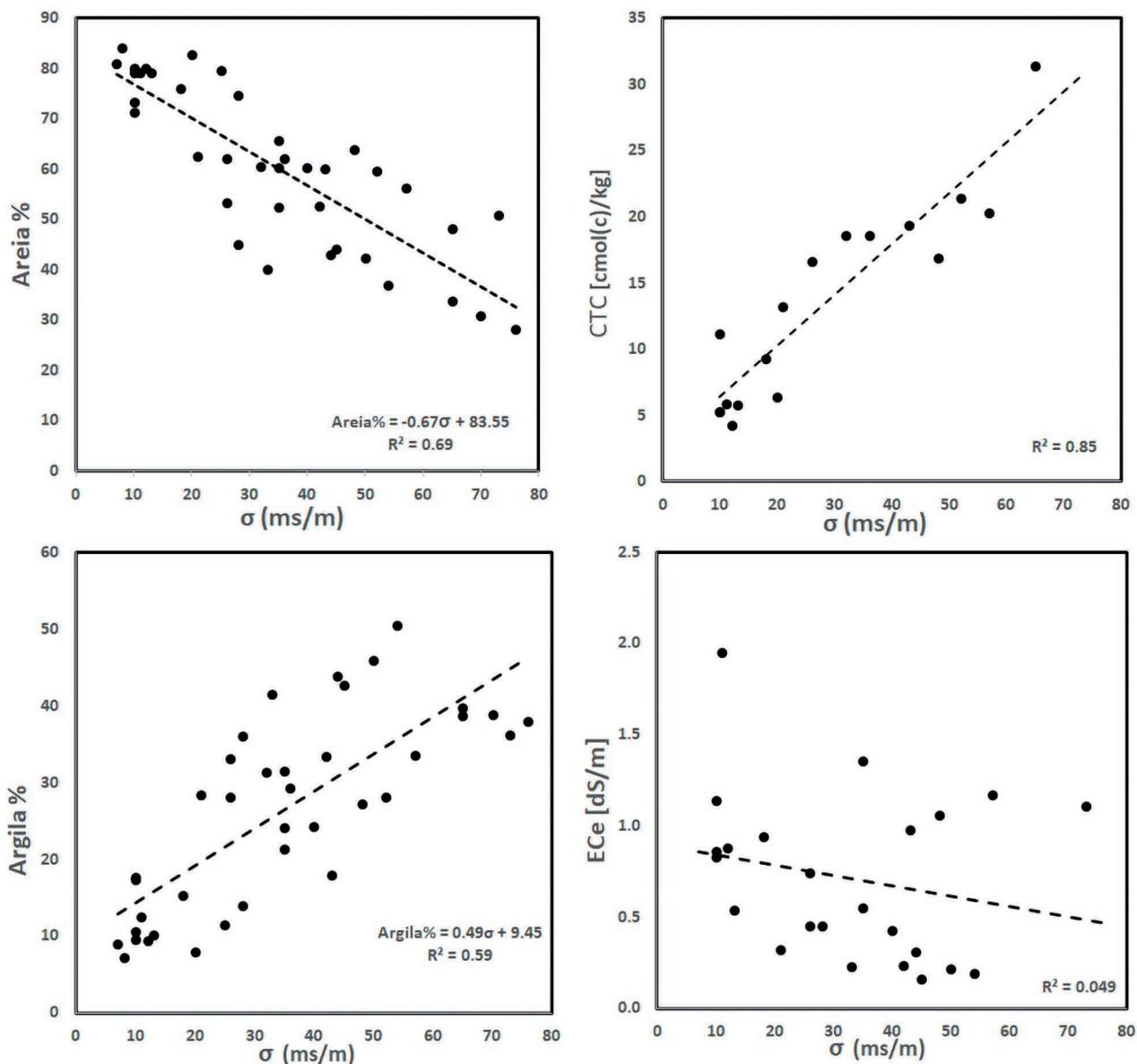


Figura 3 – Correlação linear e equações de regressão linear entre σ (ms/m) e (a) teor de areia (%), (b) teor de argila (%), (c) CEC (cmol(c)/kg) e (d) ECe (dS/m).

Conclusões

Os resultados apresentados neste estudo são preliminares, mas promissores da utilização da indução eletromagnética para o mapeamento de propriedades do solo. É necessário analisar um maior número de amostras para se concluir da possibilidade de mapear a CTC a partir dos resultados do EMI. Os resultados obtidos podem variar, dependendo da interação complexa entre as várias propriedades de um solo. Por isso, a fim de avaliar a precisão

dos modelos obtidos, vai-se aplicar o procedimento usado neste trabalho aos restantes locais de estudo no perímetro de rega do Roxo (outros solos e outras culturas).

Encontrou-se uma correlação elevada entre σ e o teor de areia e o teor de argila, permitindo prever a distribuição espacial dessas propriedades em profundidade, numa grande área, de forma rápida e não invasiva. Este estudo mostra ainda a importância do uso de métodos tradicionais de amostra-

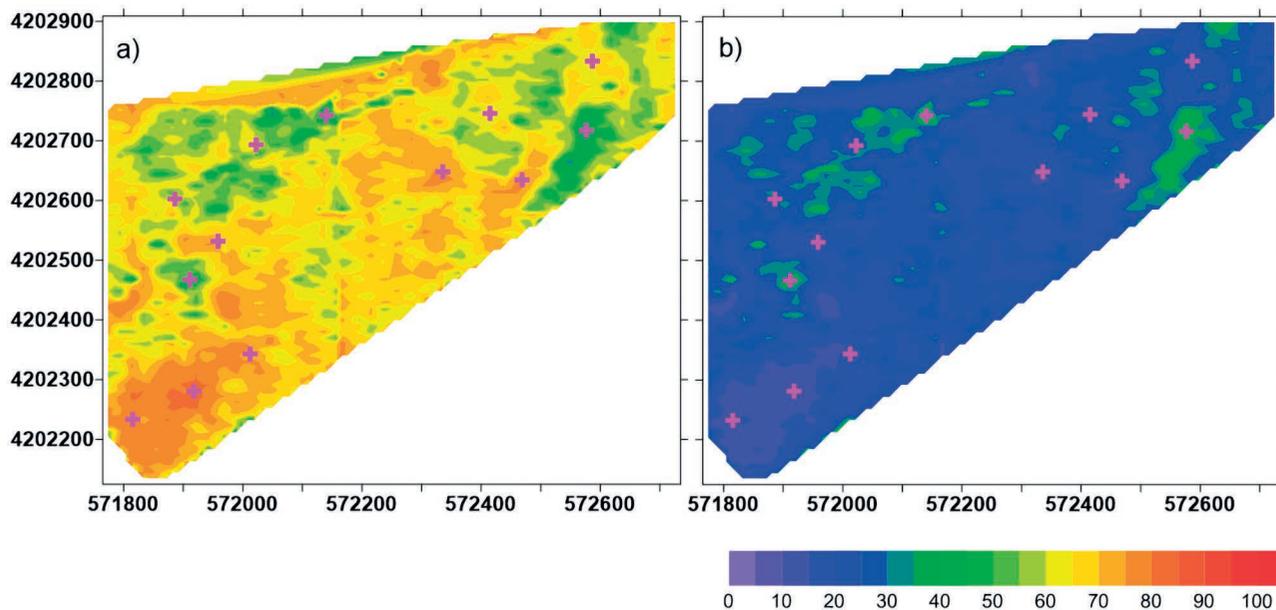


Figura 4 – Distribuição espacial do (a) teor de areia (%) e (b) teor de argila (%) previstos para a profundidade de 0,20 m. As localizações das amostragens nos pontos de referência estão indicadas por cruces rosa.

gem e de análise de solo para validação dos resultados obtidos com as novas metodologias. Neste caso particular, pode-se explorar que propriedades do solo estão a dominar as leituras efetuadas com o EMI e depois fazer o mapeamento de grandes áreas. O uso de técnicas de indução eletromagnética (EMI) é importante no conhecimento da variabilidade espacial das propriedades do solo. Este conhecimento é indispensável para a agricultura de precisão, mas também para otimizar os fatores de produção e para alcançar a gestão sustentável do solo agrícola. 🌱

Agradecimentos

Os resultados apresentados neste artigo foram obtidos no âmbito dos projetos PTDC/ASP-SOL/28796/2017 “Aumento da produtividade do regadio através do uso sustentável do solo, SOIL4EVER” e UIDB/50019/2020 (IDL) financiados pela Fundação para a Ciência e Tecnologia. As equipas têm o apoio da Associação de Beneficiários do Roxo.

Referências

- Cardoso, J.C. (1974). A classificação de solos de Portugal. *Boletim de Solos do S.R.O.A.*, **17**:14–46.
- Farzadian, M.; Paz, M.C.; Monteiro Santos, F.; Gonçalves, M.C.; Paz, A.M.; Castanheira, N.L.; Triantafyllis, J. (2019). Mapping soil salinity using electromagnetic conductivity imaging – a comparison of regional and location-specific calibrations. *Land Degradation and Development*, **30**:1393–1406. <https://doi.org/10.1002/ldr.3317>.
- Paz, A.; Castanheira, N.; Farzadian, M.; Paz, M.C.; Gonçalves, M.C.; Monteiro Santos, F.; Triantafyllis, J. (2020). Prediction of soil salinity and sodicity using electromagnetic conductivity imaging. *Geoderma*, **361**:114086, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114086>.