

# Avaliação da estabilidade temporal de zonas homogêneas de gestão (ZHG) em pastagens permanentes

## Evaluation of temporal stability of management zones (MZ) in permanent pastures

João Serrano<sup>1,\*</sup>, J. Marques da Silva<sup>1</sup>, Luis Paniáguas<sup>2</sup> e Francisco J. Moral<sup>3</sup>

<sup>1</sup> MED—Mediterranean Institute for Agriculture, Environment and Development and CHANGE—Global Change and Sustainability Institute, Universidade de Évora, Portugal

<sup>2</sup> Escuela de Ingenierías Agrarias, Universidad de Extremadura, Avenida Adolfo Suárez, S/N, 06007 Badajoz, Spain

<sup>3</sup> Departamento de Expresión Gráfica, Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Extremadura, Avenida de Elvas s/n, 06006 Badajoz, Spain

(\*E-mail: [jms@uevora.pt](mailto:jms@uevora.pt))

<https://doi.org/10.19084/rca.34485>

Recebido/received: 2024.01.28

Aceite/accepted: 2024.03.19

### RESUMO

A Agricultura de Precisão (AP) procura validar ferramentas tecnológicas que permitam captar a variabilidade espacial das culturas e do solo, o que constitui a base para o estabelecimento de zonas homogêneas de gestão (ZHG). Os sensores que medem a condutividade elétrica aparente do solo ( $CE_a$ ) são exemplo destas ferramentas no levantamento da variabilidade espacial das características do solo. A estabilidade temporal dos padrões de variabilidade espacial da  $CE_a$  é essencial para assegurar corretas decisões a médio e longo prazo. Neste estudo, foram usados dois sensores de  $CE_a$ , um sensor de contacto (Veris 2000 XA) e um sensor de indução eletromagnética (EM-38), em quatro parcelas de pastagens permanentes de sequeiro no Alentejo. O levantamento com o sensor de contacto foi realizado em outubro de 2018 e o levantamento com o sensor de indução foi realizado em setembro de 2020. Este estudo teve como objetivo avaliar a estabilidade temporal dos padrões das ZHG resultantes de medições da  $CE_a$  com diferentes sensores em diferentes datas. O processamento de dados incluiu a sincronização das coordenadas geográficas obtidas pelos dois sensores em cada parcela e o estabelecimento de ZHG a partir de análise geoestatística, tanto da  $CE_a$  como da altimetria. Apesar das condições do solo serem diferentes, nomeadamente em termos de humidade, e dos sensores terem uma forma diferente de medição (de contacto versus não contacto), os valores da  $CE_a$  mostraram correlações estatisticamente significativas em todos os campos experimentais, o que se refletiu na estabilidade dos padrões espaciais das ZHG obtidas. Estes resultados abrem boas perspetivas para futuros desenvolvimentos, os quais deverão ocorrer ao nível dos algoritmos que permitam a validação da variabilidade espacial e da estabilidade temporal da  $CE_a$  através de amostragem inteligente do solo, conduzindo a recomendações sustentadas ao nível da fertilização ou da correção do solo.

**Palavras-chave:** pastagens, variabilidade do solo, sensores, condutividade elétrica do solo

### ABSTRACT

Precision agriculture (PA) intends to validate technological tools that capture soil and crop spatial variability, which constitute the basis for the establishment of differentiated management zones (MZ). Soil apparent electrical conductivity ( $EC_a$ ) sensors are commonly used to survey soil spatial variability. Temporal stability of the surveys is essential to ensure correct medium and long-term decisions. In this study, an  $EC_a$  contact-type sensor (Veris 2000 XA) and an electromagnetic induction sensor (EM-38) were used in four fields of dryland pastures in Alentejo region of Portugal. The first survey was carried out in October 2018 and the second was carried out in September 2020. The aim of this study was to assess the temporal stability of  $EC_a$  patterns using different types of sensors. Data processing involved synchronizing geographic coordinates obtained by the two types of  $EC_a$  sensors in each location and establishing MZ based on geostatistical analysis of altimetry and  $EC_a$  data. Although the basic technologies have different principles (contact versus non-contact sensors), the surveys were carried out at different soil moisture conditions and were temporarily separated (about 2 years),  $EC_a$  measurements showed statistically significant correlation in all experimental fields, which was reflected in spatially stable patterns of the MZ maps. These results provide perspectives for future developments, which will need to occur in the creation of algorithms that allow validating the spatial variability and temporal stability of  $EC_a$  through smart soil sampling and analysis to allow recommendations for sustained soil amendment or fertilization.

**Keywords:** pastures, soil variability, sensors, soil electrical conductivity

## INTRODUÇÃO

Vários estudos mostraram a acentuada variabilidade espacial das propriedades do solo em parcelas agrícolas (Peralta & Costa, 2013; Serrano *et al.*, 2017). A monitorização espaço - temporal das principais propriedades do solo permite recolher dados fundamentais e necessários para a tomada de decisão e definição de estratégias de gestão das atividades agrícolas (King *et al.*, 2005; Bullock *et al.*, 2009; Peralta *et al.*, 2015). Por outro lado, a variabilidade espacial e a estabilidade temporal são duas condições essenciais para a implementação de tecnologias de taxa variável (VRT- “Variable Rate Technology”) (Schellberg *et al.*, 2008), com o objetivo de aumentar a rentabilidade e reduzir o impacto ambiental negativo da agricultura moderna (Mat Su & Adamchuck, 2023).

São várias as referências à utilização de sensores para cartografar as propriedades físicas e químicas do solo e para dividir o campo em áreas menores e mais homogêneas (zonas homogêneas de gestão, ZHG) (Adamchuck *et al.*, 2004; Ahrends *et al.*, 2023). A definição de ZHG permite apoiar a tomada de decisão, por exemplo, para decidir sobre os locais de amostragem de solo (amostragem inteligente de solo) (Ylagan *et al.*, 2022) ou para aplicação de fatores de produção a taxa variável (VRA- “Variable Rate Application”) (McCutcheon *et al.*, 2006; Serrano *et al.*, 2014; Medeiros *et al.*, 2016).

A amostragem tradicional do solo compreende a recolha intensiva de amostras, complementada com o trabalho exaustivo de laboratório (Peralta *et al.*, 2015). Esta é, contudo, impraticável à escala agrícola, porque requer a recolha de muitas amostras para obter uma boa representação dos padrões espaciais do solo, o que é exigente em mão-de-obra, é demorado e caro (Peralta *et al.*, 2015). Por isso, é desejável identificar técnicas de medida que permitam a obtenção ágil e rápida de dados para o mapeamento das variáveis de campo (King *et al.*, 2005).

O uso de medições georreferenciadas da  $CE_a$ , combinadas com sistemas globais de navegação por satélite (GNSS) e sistemas de informação geográfica (GIS), tornaram-se fundamentais na caracterização do padrão espacial das propriedades do solo (Sudduth *et al.*, 2003; Moral *et al.*, 2010).

Existem fundamentalmente dois tipos de sensores de  $CE_a$  atualmente no mercado: (i) sensores de contacto (como o sensor Veris 2000 XA) que utilizam elétrodos em discos, que fazem o contacto com o solo, para medir a resistividade elétrica (o inverso da condutividade elétrica); e (ii) sensores sem contacto (como os sensores Dualem 1S ou EM-38), baseados no princípio da indução eletromagnética (Moral *et al.*, 2010). Ambos apresentam vantagens e desvantagens, e os diferentes princípios de funcionamento destes tipos de sensores devem ser considerados na seleção de sistemas de deteção da  $CE_a$  para cada aplicação (Serrano *et al.*, 2014). É geralmente reconhecido que ambos os tipos de sensores representam ferramentas práticas para delinear ZHG baseadas nas características do solo (McCutcheon *et al.*, 2006). Tem sido demonstrada a relação da  $CE_a$  com outros atributos do solo, incluindo a salinidade, a textura, a profundidade, o pH, a humidade, a matéria orgânica e a capacidade de troca catiónica (Peralta *et al.*, 2015; Medeiros *et al.*, 2016). Segundo Farahani e Buchleiter (2004), embora a magnitude dos valores absolutos da  $CE_a$  possa mudar em resposta a modificações nas propriedades dinâmicas do solo, espera-se que o padrão de variabilidade espacial deste parâmetro não mude significativamente ao longo do tempo (Medeiros *et al.*, 2016). É, portanto, essencial que as medições de  $CE_a$  retratem o padrão de variabilidade espacial do solo, expresso em termos de delimitação das ZHG, mas também o façam de forma estável ao longo do tempo (Medeiros *et al.*, 2016), garantindo decisões de gestão de médio e longo prazo (Serrano *et al.*, 2017). Considerando que as ZHG são frequentemente utilizadas por vários anos, as variáveis devem ser temporalmente estáveis (Schenatto *et al.*, 2017). Vários estudos avaliaram e relataram a estabilidade temporal da  $CE_a$ . Alguns relataram associações temporais fracas (McCutcheon *et al.*, 2006) e outros demonstraram estabilidade temporal da  $CE_a$  (Liao *et al.*, 2014; Martini *et al.*, 2017; Serrano *et al.*, 2017), não há, contudo, estudos conhecidos de avaliação da estabilidade temporal das ZHG, especialmente quando obtida a partir de medições com sensores com princípios diferentes.

O objetivo deste estudo foi avaliar a estabilidade temporal dos padrões das ZHG resultantes de medições da  $CE_a$  utilizando dois tipos diferentes de sensores em diferentes datas.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Caraterísticas dos campos experimentais

O trabalho experimental decorreu em quatro parcelas: duas na herdade da Mitra (“ECO” e “MIT”; a primeira com 4,3 ha; coordenadas 38°53,10' N; 8°01,10' W; a segunda com 20,2 ha; coordenadas 38°32,17' N; 7°59,83' W), perto de Valverde; uma na herdade das Murteiras (“MUR”; com 29,6 ha; coordenadas 38°23,4' N; 7°52,5' W), perto da Torre de Coelheiros; e uma na herdade dos Padres (“PAD”; com 32,2 ha; coordenadas 38°36,4' N; 8°8,7' W), perto de Montemor-o-Novo. Trata-se de pastagens permanentes biodiversas de sequeiro enquadradas no ecossistema Montado de azinho. O solo nestas parcelas é predominantemente do tipo Cambissolo (FAO, 2006), caracterizado por textura grosseira (entre arenoso-franco e franco-arenoso), normalmente ácidos, com baixa fertilidade. Os animais em pastoreio extensivo (permanente ou rotativo) são espécies autóctones de ovinos ou bovinos. A localização destas parcelas (todas no distrito de Évora, na região Alentejo) é representativa do clima “Csa” (clima Mediterrânico de verão quente de acordo com a classificação climática de Köppen–Geiger),

com grande amplitude térmica (mínima próxima dos 0°C no Inverno e máxima superior a 40°C no Verão), precipitação média anual normalmente abaixo de 600 mm, concentrada entre outubro e abril e praticamente inexistente no Verão.

### Procedimento experimental

A Figura 1 mostra, de forma esquemática, a abordagem experimental proposta neste estudo.

O levantamento topográfico dos campos experimentais foi realizado em outubro de 2018 utilizando um GPS RTK (“Real Time Kinematic”; Trimble RTK/PP-4700 GPS, Trimble Navigation Limited, Sunnyvale, CA, EUA). Para cada campo, o modelo digital do terreno foi gerado usando a ferramenta de interpolação “TIN” do ArcGIS 9.3. Esta informação vetorial foi convertida numa superfície com resolução de 1 m usando a ferramenta “Spatial Analyst” do ArcGIS.

A  $CE_a$  foi medida nos quatro campos experimentais com um sensor de contacto “Veris 2000 XA” (Veris Technologies, Salina, KS, EUA; Figura 2a)

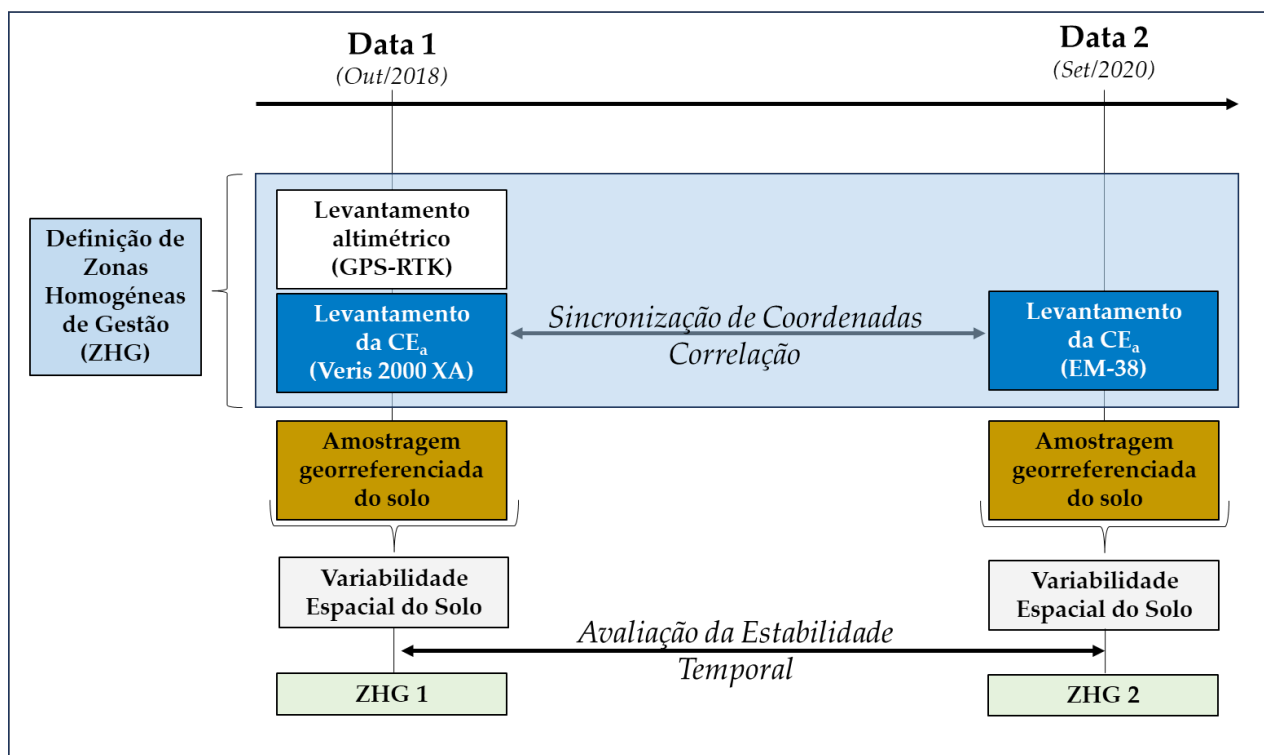


Figura 1 - Representação esquemática da abordagem experimental proposta neste estudo.

em outubro de 2018. Este sensor é montado num chassis com duas rodas, e os seus componentes ativos consistem em dois pares de eléctrodos, apoiados em discos ajustáveis. Um par de eléctrodos injeta corrente no solo (discos mais externos), enquanto o outro par (discos mais internos) mede a diferença de tensão. O ajustamento dos discos gera um conjunto de dados da camada superficial do solo (de 0 a 0,30 m de profundidade). O sensor, equipado com antena GNSS, foi rebocado por um veículo todo-terreno a uma velocidade média de 2,5 m s<sup>-1</sup>, e foram feitas sucessivas passagens espaçadas entre si entre 10 e 15 m. As medições de CE<sub>a</sub> foram registadas a cada segundo.

A CE<sub>a</sub> também foi medida em setembro de 2020 utilizando um sensor sem contacto EM-38 (Geonics Ltd., Mississauga, ON, Canadá; Figura 2b). Este sensor foi regulado para obter os dados da camada superficial do solo (0–0,375 m). O dispositivo foi rebocado por um veículo todo-terreno equipado com antena GNSS. O veículo manteve uma velocidade média de 2,5 m s<sup>-1</sup>, fazendo passagens sucessivas pelos campos espaçadas entre si entre 10 e 15 m, registando as medições de CE<sub>a</sub> a cada segundo.

Os mapas de EC<sub>a</sub> foram gerados utilizando o módulo ArcMap do ArcGIS.

Entre as duas medições da CE<sub>a</sub> não foram realizadas intervenções no solo, nem aplicação de adubos ou corretivos. Em ambas as datas e em cada campo experimental, após as medições da CE<sub>a</sub>, foram recolhidas 8 amostras compósitas e georreferenciadas

do solo (profundidade de 0-0,30 m). Cada amostra compósita resultou da combinação de cinco subamostras recolhidas numa área de aproximadamente 10 m × 10 m. As amostras de solo foram transportadas para o laboratório “AmbiTerra” da Universidade de Évora em caixas metálicas, pesadas e depois secas a 105 °C até peso constante para determinação da humidade gravimétrica do solo. A fração fina do solo (com diâmetro < 2 mm) foi submetida a análises químicas utilizando métodos laboratoriais de referência (AOAC, 2005) para determinação do pH, da matéria orgânica (MO), do fósforo (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) e do potássio (K<sub>2</sub>O). O pH em água (1:2,5) foi determinado pelo método potenciométrico. A MO foi determinada por combustão e medição do CO<sub>2</sub> por infravermelhos. Para extração do fósforo e do potássio foi usado o método Egner-Riehm. Na data 2, as amostras de solo também foram processadas para determinação da textura e da capacidade de troca catiónica (CTC). A análise granulométrica (areia, limo e argila) foi realizada num sedimentógrafo (modelo 5100 da Micromeritics), enquanto a CTC foi medida pelo método do acetato de amónio.

### Análise de dados

Com o objetivo de avaliar a variabilidade espacial do solo, foi realizada uma análise estatística descritiva inicial (média, desvio padrão e coeficiente de variação, CV) dos parâmetros medidos.

Os dados de CE<sub>a</sub> obtidos pelo sensor Veris, em outubro de 2018, e pelo EM-38, em setembro de 2020,



**Figura 2** - Medição da condutividade elétrica aparente do solo nos campos experimentais: (a) sensor Veris 2000 XA; (b) sensor EM-38.

foram sincronizados utilizando as coordenadas geográficas de cada ponto para avaliar a estabilidade temporal das medidas de  $CE_a$ .

Um conjunto de dados combinado foi criado para cada data: cada registro obtido pelo sensor Veris foi emparelhado com o registro mais próximo obtido pelo sensor EM-38, com base nas respectivas coordenadas geográficas. Caso não fosse encontrada correspondência nas coordenadas espaciais num raio de 5 m, esse ponto era removido do conjunto de dados. Os conjuntos de dados, ou seja, pontos com coordenadas geográficas comuns em ambos os levantamentos (data 1 e data 2) em cada campo experimental foram submetidos à análise de correlação linear, para obtenção dos coeficientes de correlação de Pearson ( $r$ ) pelo método dos mínimos quadrados ( $p < 0,05$ ).

Os resultados da  $CE_a$  obtidos em cada data, combinados com os dados altimétricos (levantamento realizado na primeira data) foram submetidos a análises geoestatísticas que permitiram a definição de três ZHG (maior potencial, intermédio e menor potencial) em cada data e campo experimental. Os procedimentos para delimitação das ZHG foram descritos por Fridgen *et al.* (2004).

Para analisar a estabilidade temporal das ZHG definidas em cada parcela, foi realizada uma comparação entre cada pixel dos mapas de ZHG obtidos em cada data. Assim, para cada parcela, foi realizado um processo de reclassificação nos dois mapas de ZHG, atribuindo o valor 0 aos pixels das ZHG com maior potencial, 1 aos de potencial intermédio e 2 aos de baixo potencial. Posteriormente, utilizando álgebra de mapas, ambos os mapas de ZHG foram sobrepostos, produzindo um novo mapa distinguindo três zonas possíveis: uma onde os pixels têm valor 0, significando que as ZHG coincidem em ambos os mapas; outra onde os pixels têm valor 1, significando que há uma diferença de 1 entre os valores dos pixels nos dois mapas, e uma terceira zona com pixels cujo valor é 2, significando que os pixels dos dois mapas têm uma diferença de 2 entre eles. Neste novo mapa, a zona contendo pixels com valor 0 foi denominada “estável”, a zona com pixels com valor 1 foi denominada “instável” e a zona contendo pixels com valor 2 foi denominada “muito instável”.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### *Variabilidade espacial e temporal das características do solo*

O Quadro 1 apresenta os resultados da estatística descritiva (média  $\pm$  desvio padrão) dos parâmetros do solo nas quatro parcelas de ensaio, em ambas as datas de avaliação (outubro 2018 e setembro 2020). Pode verificar-se que a umidade do solo foi baixa nos dois levantamentos realizados nas parcelas ECO e MIT (entre 5,5 e 8,1%), com CV abaixo de 30%. No caso das parcelas MUR e PAD, os primeiros levantamentos (data 1) foram realizados com valores de umidade no solo muito superiores (17% em MUR e 19% em PAD) do que os segundos levantamentos (10% em MUR e 7% em PAD). Por outro lado, os valores de  $CE_a$  foram significativamente superiores nas medições realizadas em todas as parcelas na data 2, com o sensor EM-38, quando comparadas com as medições realizadas na data 1, com o sensor Veris 2000 XA. As medições com o sensor de contacto (Veris) dependem da penetração adequada dos discos (e dos respetivos eléctrodos), apresentando maior dificuldade em solos com reduzida umidade, relativamente compactados (sujeitos a pisoteio animal) e com pedras (como é o caso). As medições com sensores de indução (sem contacto) superaram essas dificuldades e, portanto, parecem mais adaptados às medições em pastagens de sequeiro. As medições com o sensor Veris mostraram CV de aproximadamente 50-70%, enquanto as medições com o sensor EM-38 mostraram CV sistematicamente mais baixos (entre 15-50%).

No que respeita aos parâmetros químicos do solo, os resultados apresentados confirmam a sua variabilidade espacial, refletida no CV, tanto dentro de cada parcela como entre parcelas, e destacam algumas das principais limitações típicas destes solos: em geral, apresentam baixo pH (ligeiramente ácido; com reduzido CV,  $< 10\%$ ), textura grosseira, teor relativamente baixo de MO (entre 13,1 e 27,3 g  $kg^{-1}$ , com CV entre 7 e 35%), baixos teores de fósforo ( $P_2O_5 < 30$  mg  $kg^{-1}$ , com CV elevado, geralmente  $> 30\%$ ) e níveis relativamente altos de potássio (geralmente  $> 45$  mg  $kg^{-1}$  e, em alguns casos,  $> 100$  mg  $kg^{-1}$ , com CV elevado, geralmente  $> 30\%$ ), aspetos já apresentados em outros estudos (Serrano *et al.*, 2022).

**Quadro 1** - Estatística descritiva (média ± desvio padrão) dos parâmetros do solo obtidos no conjunto de 8 amostras compósitas recolhidas nas quatro parcelas de ensaio, em ambas as datas de avaliação (1- Outubro 2018; 2- Setembro 2020)

Parcela	ECO		MIT		MUR		PAD	
Data de avaliação	1	2	1	2	1	2	1	2
CE <sub>a</sub> (mS m <sup>-1</sup> )	2,1 ± 1,2	12,2 ± 4,6	1,4 ± 1,0	9,1 ± 4,6	3,9 ± 2,4	13,8 ± 5,4	8,5 ± 4,1	18,6 ± 2,9
Humid (%)	6,9 ± 2,0	5,5 ± 0,7	8,1 ± 1,0	7,6 ± 1,6	16,8 ± 5,1	10,0 ± 2,3	18,8 ± 2,4	6,6 ± 1,4
pH	5,6 ± 0,2	5,6 ± 0,3	5,5 ± 0,2	5,6 ± 0,3	5,8 ± 0,5	6,0 ± 0,5	6,2 ± 0,5	6,4 ± 0,5
MO (g kg <sup>-1</sup> )	13,1 ± 2,3	22,3 ± 8,2	15,4 ± 3,0	19,2 ± 4,3	18,2 ± 6,1	27,0 ± 5,2	22,1 ± 4,1	27,3 ± 2,1
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )	51,9 ± 19,7	61,0 ± 23,1	32,6 ± 21,5	26,5 ± 13,0	19,8 ± 17,9	29,2 ± 21,7	24,0 ± 9,1	23,7 ± 6,7
K <sub>2</sub> O (mg kg <sup>-1</sup> )	121,3 ± 28,5	158,0 ± 66,7	94,0 ± 72,1	66,3 ± 41,9	66,8 ± 26,1	95,7 ± 27,2	76,3 ± 27,2	45,3 ± 4,1
Argila (%)	-	4,0 ± 0,7	-	6,8 ± 2,4	-	8,5 ± 4,7	-	6,6 ± 2,0
Limo (%)	-	8,0 ± 2,2	-	9,5 ± 2,5	-	15,9 ± 10,6	-	15,4 ± 2,2
Areia (%)	-	88,0 ± 2,8	-	83,7 ± 3,7	-	75,6 ± 14,6	-	78,0 ± 2,6
CTC (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	-	7,4 ± 1,5	-	9,4 ± 5,8	-	8,7 ± 2,8	-	15,5 ± 1,3

CE<sub>a</sub> – Condutividade elétrica aparente; Humid – Humidade; MO – Matéria orgânica; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – Fósforo; K<sub>2</sub>O – Potássio; CTC – Capacidade de troca catiônica.

A comparação entre as datas de amostragem de solo destaca a tendência para maiores teores de MO na data 2, em relação à data 1, em todas as parcelas. Ainda quanto aos parâmetros do solo, são evidentes os baixos teores de argila (entre 4 e 8,5%, nas quatro parcelas), revelando a textura grosseira, com CV elevado (entre 17 e 55%). A CTC é relativamente baixa (em média entre 7 e 9 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>), exceto na parcela PAD onde o valor médio foi aproximadamente o dobro, sendo o CV muito variável (entre 10 e 60%).

A variabilidade espacial e temporal associada aos parâmetros do solo está em linha com outros estudos, sendo particularmente acentuada no Montado pela presença de árvores e animais em pastoreio (Schellberg *et al.*, 2008). Os efeitos combinados de um relevo ondulado, com árvores dispersas e animais em pastoreio selectivo, escolhendo as espécies botânicas e depositando a urina e fezes de forma heterogênea, proporcionam uma notável variabilidade espacial e temporal da concentração de nutrientes no solo (McCormick *et al.*, 2009). Alto CV das propriedades do solo normalmente indica alta variabilidade espacial e, conseqüentemente, sugere o interesse pela gestão diferenciada (Moral *et al.*, 2010). Por outro lado, a variabilidade espacial e a estabilidade temporal do solo são duas condições essenciais para a definição de ZHG e para a adoção de estratégias de AP (Ahrends *et al.*, 2023).

### Estabilidade temporal das ZHG

A correlação entre os valores das medições de CE<sub>a</sub>, obtidos em cada data de avaliação, após

sincronização de coordenadas, mostrou coeficientes de correlação (r) significativos (p < 0,05), em todas as parcelas: 0,506 na parcela ECO, 0,449 na parcela MIT, 0,618 na parcela MUR e 0,515 na parcela PAD. Regressões espaciais e testes pareados aplicados por McCutcheon *et al.* (2006) para investigar diferenças entre valores de CE<sub>a</sub> de diferentes datas de medição (estabilidade temporal) com um sensor de contacto (Veris) forneceram coeficientes de correlação com ampla variação (entre 0,10 e 0,76). Martini *et al.* (2017), compararam medições repetidas realizadas com um sensor de indução eletromagnética e concluíram que os padrões espaciais da CE<sub>a</sub> diferiam em função do teor de humidade e da temperatura do solo. Utilizando também um sensor de indução eletromagnética (Dualem 1S) durante um período de 7 anos, Serrano *et al.* (2017) encontraram padrões espaciais de CE<sub>a</sub> temporalmente estáveis numa pastagem, apesar das mudanças nas condições ambientais e de gestão. Vários estudos demonstraram a possibilidade de alterações significativas na CE<sub>a</sub> ao longo do tempo, no entanto, com representações de estrutura espacial relativamente estáveis (Mat Su & Adamchuck, 2023).

A aplicação de algoritmos geoestatísticos aos dados de altimetria e de CE<sub>a</sub> permitiu a definição de ZHG e a elaboração dos respetivos mapas. O Quadro 2 apresenta a área de cada ZHG (de baixo potencial, de potencial intermédio e de alto potencial), em cada data de avaliação.

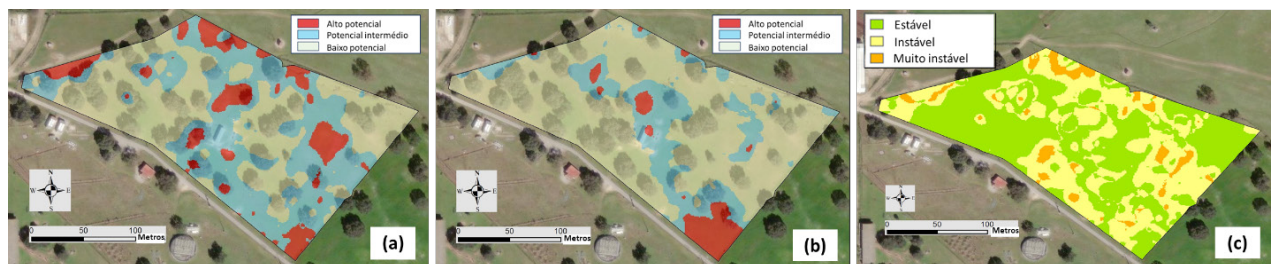
Vários métodos têm sido usados por diferentes equipas de investigação para definir as tendências espaciais e temporais (Blackmore *et al.*, 2003;

**Quadro 2** - Área de cada zona homogênea de gestão (ZHG), em cada data de avaliação, e estabilidade temporal das ZHG em percentagem da área total de cada parcela

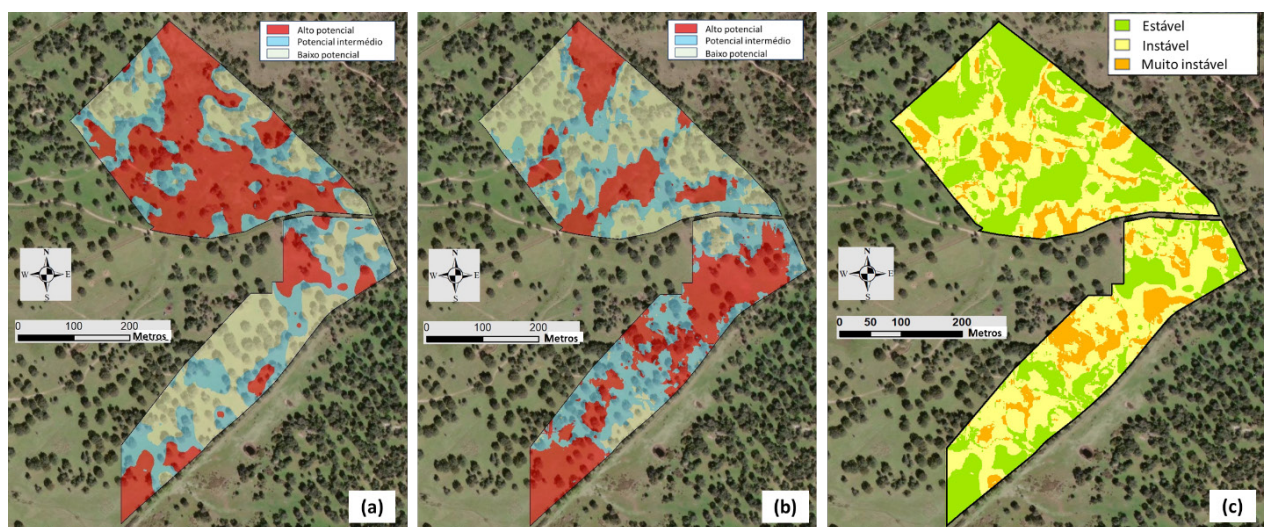
Parcela	ECO		MIT		MUR		PAD	
Data	1	2	1	2	1	2	1	2
<b>ZHG (%)</b>								
Baixo Potencial	45,7	76,9	28,7	28,5	49,9	27,4	14,3	0,9
Potencial Intermédio	41,5	17,2	31,6	37,2	34,9	32,3	60,1	42,3
Alto Potencial	12,8	5,9	39,7	34,3	15,2	40,3	25,6	56,8
<b>Estabilidade temporal das ZHG (%)</b>								
Estável	52,5		37,6		71,2		48,1	
Instável	41,8		48,8		27,5		49,5	
Muito Instável	5,7		13,6		1,3		2,4	

Xu *et al.*, 2006). Neste estudo, a estabilidade temporal das ZHG foi avaliada por um processo de reclassificação por sobreposição de mapas de ZHG, permitindo a definição de três classes: estável, instável e muito instável, expressas como percentagem da área total de cada parcela (Quadro 2).

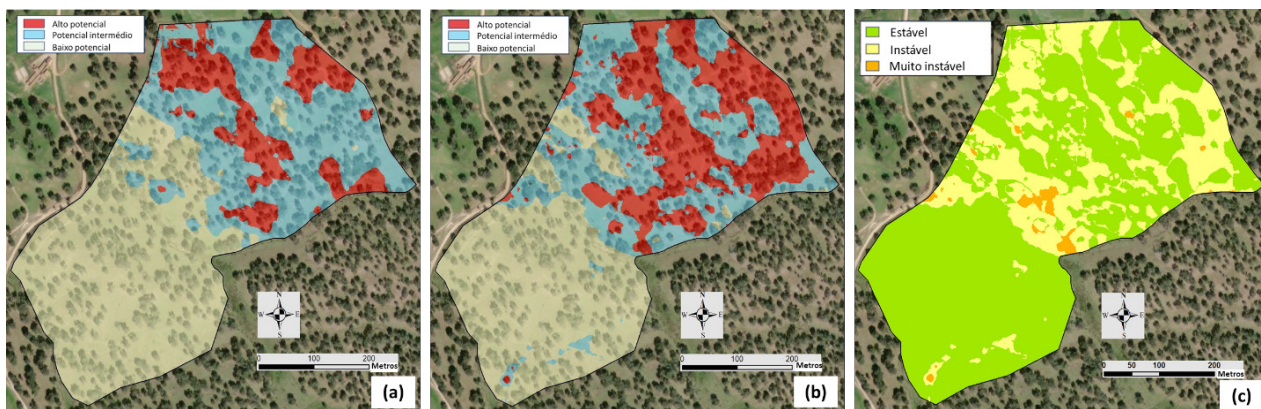
Os mapas de ZHG da primeira data de avaliação (a) e da segunda data de avaliação (b) e os mapas da estabilidade temporal das ZHG (c) são apresentados nas figuras 3 a 6, respetivamente para as parcelas ECO, MIT, MUR e PAD.



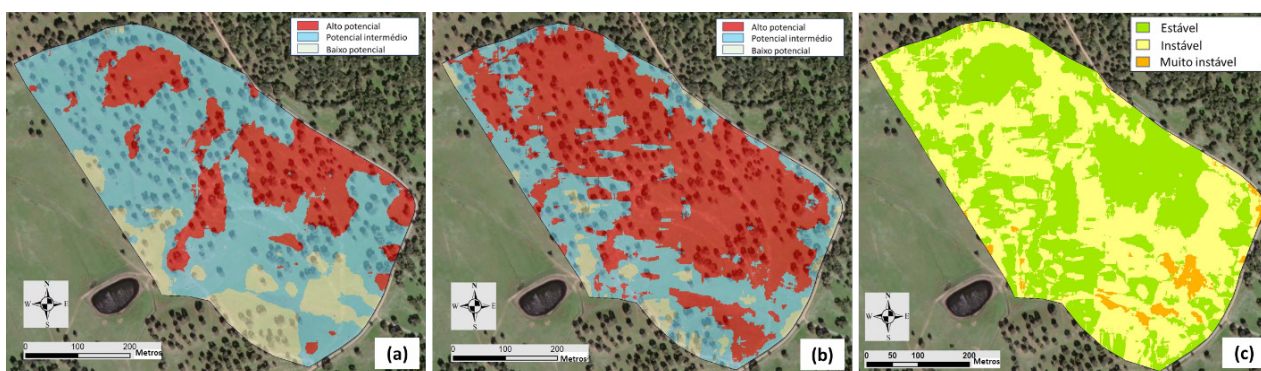
**Figura 3** - Mapas de Zonas Homogêneas de Gestão (ZHG) na primeira (a) e segunda (b) data de avaliação e de estabilidade temporal das ZHG (c) na parcela ECO.



**Figura 4** - Mapas de Zonas Homogêneas de Gestão (ZHG) na primeira (a) e segunda (b) data de avaliação e de estabilidade temporal das ZHG (c) na parcela MIT.



**Figura 5** - Mapas de Zonas Homogêneas de Gestão (ZHG) na primeira (a) e segunda (b) data de avaliação e de estabilidade temporal das ZHG (c) na parcela MUR.



**Figura 6** - Mapas de Zonas Homogêneas de Gestão (ZHG) na primeira (a) e segunda (b) data de avaliação e de estabilidade temporal das ZHG (c) na parcela PAD.

Em média, 52% da área do conjunto das quatro parcelas apresentou estabilidade temporal (manteve a mesma categoria de ZHG em ambos os levantamentos da  $CE_a$ ; com valor mínimo de 37,6% na parcela MIT e máximo de 71,2% na parcela MUR), 42% da área apresentou instabilidade temporal (enquadrando-se na categoria seguinte ou na categoria anterior de ZHG entre levantamentos da  $CE_a$ ) e apenas 6% da área se apresentou muito instável entre os dois levantamentos da  $CE_a$ . Estes resultados oferecem boas perspectivas para o uso da  $CE_a$  na definição a médio e longo prazo de ZHG. Isto pressupõe que as condições prevalentes e os fatores limitantes são consistentes ao longo dos anos (Blackmore *et al.*, 2003).

Apesar da estabilidade temporal dos padrões espaciais da  $CE_a$ , em termos relativos, reflectida nos mapas de estabilidade temporal, será interessante

em futuros trabalhos alargar o estudo a outros tipos de solos (em particular, com textura mais fina) e diferentes condições de humidade, para identificar a origem da discrepância em termos absolutos na medição de  $CE_a$  por diferentes sensores (contacto versus sem contacto), com valores sistematicamente superiores obtidos pelo sensor EMI (EM-38, neste caso) em comparação com o sensor de contacto (Veris 2000 XA, neste caso).

## CONCLUSÕES

Neste estudo ficou demonstrada a variabilidade espacial das características do solo no ecossistema Montado, o que é um excelente indicador para efeitos de gestão diferenciada. Foram definidas três ZHG (de alto potencial, de potencial intermédio e de baixo potencial) com base em análises



geoestatísticas da  $CE_a$  e da altimetria. Medições de  $CE_a$  com diferentes sensores (com e sem contacto), realizadas com praticamente dois anos de intervalo, revelaram padrões espaciais de ZHG com notável estabilidade temporal (média de 52% da área total em quatro parcelas), o que mostra o potencial de utilização da  $CE_a$  nas decisões de gestão de médio e longo prazo. Sendo este um estudo exploratório, cujos resultados preliminares abrem boas perspectivas de aplicação, será importante alargar a base de amostragem, nomeadamente a outros tipos de solo e com outros sensores, com vista a obter dados mais robustos. Este trabalho sugere também que

futuros desenvolvimentos devem concentrar-se na criação de algoritmos para validar a variabilidade espacial e a estabilidade temporal da  $CE_a$  através de amostragem inteligente do solo, melhorando assim o processo de recomendações para a correção ou fertilização do solo.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi suportado por fundos Nacionais através da Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) – Projeto IIDB/05183/2020.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AOAC (2005) - *Official Methods of Analysis of AOAC International*. 18th ed.; AOAC International: Arlington, VA, USA.
- Adamchuk, V.I.; Hummel, J.W.; Morgan, M.T. & Upadhyaya, S.K. (2004) - On-the-go soil sensors for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 44, n. 1, p. 71-91. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2004.03.002>
- Ahrends, H.E.; Simojoki, A. & Lajunen, A. (2023) - Spatial pattern consistency and repeatability of proximal soil sensor data for digital soil mapping. *European Journal of Soil Science*, vol. 74, n. 5, art. e13409. <https://doi.org/10.1111/ejss.13409>
- Blackmore, S.; Godwin, R. & Fountas, S. (2003) - The analysis of spatial and temporal trends in yield map data over 6 years. *Biosystems Engineering*, vol. 84, n. 4, p. 455-466. [https://doi.org/10.1016/S1537-5110\(03\)00038-2](https://doi.org/10.1016/S1537-5110(03)00038-2)
- Bullock, D.S.; Ruffo, M.L.; Bullock, D.G. & Bollero, G.A. (2009) - The value of variable rate technology: An information-theoretical approach. *American Journal of Agricultural Economics*, vol. 21, n. 1, p. 209-223. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8276.2008.01157.x>
- FAO (2006) - *World reference base for soil resources*. World soil resources reports N°103. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Farahani, H.J. & Buchleiter, G.W. (2004) - Temporal stability of soil electrical conductivity in irrigated sandy fields in Colorado. *Transactions of the ASAE*, vol. 47, n. 1, p. 79-90. <https://doi.org/10.13031/2013.15873>
- Fridgen, J.J.; Kitchen, N.R.; Sudduth, K.A.; Drummond, S.T.; Wiebold, W.J. & Fraisse, C.W. (2004) - Management zone analyst (MZA): software for subfield management zone delineation. *Agronomy Journal*, vol. 96, n. 1, p. 100-108. <https://doi.org/10.2134/agronj2004.1000>
- King, J.; Dampney, P.; Lark, R.; Wheeler, H.; Bradley, R. & Mayr, T. (2005) - Mapping potential crop management zones within fields: use of yield-map series and patterns of soil physical properties identified by electromagnetic induction sensing. *Precision Agriculture*, vol. 6, n. 2, p. 167-181. <https://doi.org/10.1007/s11119-005-1033-4>
- Liao, K.; Zhu, Q. & Doolittle, J. (2014) - Temporal stability of apparent soil electrical conductivity measured by electromagnetic induction techniques. *Journal of Mountain Science*, vol. 11, p. 98-109. <https://doi.org/10.1007/s11629-012-2630-0>
- Martini, E.; Werban, U.; Zacharias, S.; Pohle, M.; Dietrich, P. & Wollschläger, U. (2017) - Repeated electromagnetic induction measurements for mapping soil moisture at the field scale: Validation with data from a wireless soil moisture monitoring network. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 21, n. 1, p. 495-513. <https://doi.org/10.5194/hess-21-495-2017>
- Mat Su, A.S. & Adamchuk, V.I. (2023) - Temporal and operation-induced instability of apparent soil electrical conductivity measurements. *Frontiers in Soil Science*, vol. 3, art. 1137731. <https://doi.org/10.3389/fsoil.2023.1137731>

- McCormick, S.; Jordan, C. & Bailey, J. (2009) - Within and between-field spatial variation in soil phosphorus in permanent grassland. *Precision Agriculture*, vol. 10, n. 3, p. 262-276. <https://doi.org/10.1007/s11119-008-9099-4>
- McCutcheon, M.C.; Farahani, H.J.; Stednick, J.D.; Buchleiter, G.W. & Green, T.R. (2006) - Effect of soil water on apparent soil electrical conductivity and texture relationships in a dryland field. *Biosystems Engineering*, vol. 94, n. 1, p. 19-32. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.01.002>
- Medeiros, W.N.; de Queiroz, D.M.; Valente, D.S.M.; de Pinto, F. & Melo, C. (2016) -The temporal stability of the variability in apparent soil electrical conductivity. *Bioscience Journal*, vol. 32, n. 1, p. 150-159. <https://doi.org/10.14393/BJ-v32n1a2016-26287>
- Moral, F.; Terrón, J. & Marques da Silva, J. (2010) - Delineation of management zones using mobile measurements of soil apparent electrical conductivity and multivariate geostatistical techniques. *Soil & Tillage Research*, vol. 106, n. 2, p. 335-343. <https://doi.org/10.1016/j.still.2009.12.002>
- Peralta, N.R. & Costa, J.L. (2013) - Delineation of management zones with soil apparent electrical conductivity to improve nutrient management. *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 99, p. 218-226. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.09.014>
- Peralta, N.R.; Cicore, P.L.; Marino, M.A.; Marques da Silva, J.R. & Costa, J.L. (2015) - Use of geophysical survey as a predictor of the edaphic properties variability in soils used for livestock production. *Spanish Journal of Agricultural Research*, vol. 13, n. 4, art. e1103.
- Schellberg, J.; Hill, M.J.; Gerhards, R.; Rothmund, M. & Braun, M. (2008) - Precision agriculture on grassland: Applications, perspectives and constraints. *European Journal of Agronomy*, vol. 29, n. 2-3, p. 59-71. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2008.05.005>
- Schenatto, K.; de Souza, E.G.; Bazzi, C.L.; Gavioli, A.; Betzek, N.M. & Beneduzzi, H.M. (2017) - Normalization of data for delineating management zones. *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 143, p. 238-248. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.10.017>
- Serrano, J.; Shahidian, S. & Marques da Silva, J. (2014) - Spatial and temporal patterns of apparent electrical conductivity: DUALEM versus Veris sensors for monitoring soil properties. *Sensors*, vol. 14, n. 6, p. 10024-10041. <https://doi.org/10.3390/s140610024>
- Serrano, J.; Shahidian, S. & Marques da Silva, J. (2017) - Spatial variability and temporal stability of apparent soil electrical conductivity in a Mediterranean pasture. *Precision Agriculture*, vol. 18, n. 2, p. 245-263. <https://doi.org/10.1007/s11119-016-9460-y>
- Serrano, J.; Shahidian, S.; Paixão, L.; Marques da Silva, J. & Moral, F. (2022) - Management zones in pastures based on soil apparent electrical conductivity and altitude: NDVI, soil and biomass sampling validation. *Agronomy*, vol. 12, n. 4, art. 778. <https://doi.org/10.3390/agronomy12040778>
- Sudduth, K.A.; Kitchen, N.R.; Bollero, G.A.; Bullock, D.G. & Wiebold, W.J. (2003) - Comparison of electromagnetic induction and direct sensing of soil electrical conductivity. *Agronomy Journal*, vol. 95, n. 3, p. 472-482. <https://doi.org/10.2134/agronj2003.4720>
- Xu, H.W.; Wang, K.; Bailey, J.; Jordan, C. & Withers, A. (2006) - Temporal stability of sward dry matter and nitrogen yield patterns in a temperate grassland. *Pedosphere*, vol. 16, n. 6, p. 735-744. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(06\)60109-4](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(06)60109-4)
- Ylagan, S.; Brye, K.R.; Ashworth, A.J.; Owens, P.R.; Smith, H. & Poncet, A.M. (2022) - Using apparent electrical conductivity to delineate field variation in an agroforestry system in the Ozark Highlands. *Remote Sensing*, vol. 14, n. 22, art. 5777. <https://doi.org/10.3390/rs14225777>