

# MEDIÇÃO E MAPEAMENTO DA CONDUTIVIDADE ELÉCTRICA APARENTE DO SOLO EM PASTAGENS

## MESUREMENT AND MAPPING THE APPARENT SOIL ELECTRICAL CONDUCTIVITY IN PASTURES

João Manuel Serrano<sup>1</sup>, José Oliveira Peça<sup>1</sup>, José Rafael Silva<sup>1</sup>, Shakib Shahidian<sup>1</sup>

### RESUMO

O objectivo geral deste estudo foi testar uma sonda de indução electromagnética para avaliar a variabilidade do solo e da pastagem num projecto de agricultura de precisão. Esta avaliação é a base para a gestão diferenciada da fertilização, principal ferramenta utilizada pelos agricultores para melhoria das pastagens permanentes em Portugal. O processo tradicional de amostragem e avaliação do solo e da pastagem é muito exigente em tempo, trabalho e reagentes e pode comprometer um projecto de agricultura de precisão. Este artigo descreve as principais etapas seguidas pelos autores para simplificar a metodologia de avaliação baseada na medição da condutividade eléctrica aparente do solo. Os ensaios foram realizados numa parcela com aproximadamente 6 hectares de área, que foi subdividida em quadrículas de 28 m de lado. As amostras de solo e de pastagem e a avaliação da condutividade eléctrica do solo foram georeferenciadas com um GPS-RTK. Os dados geoespaciais foram processados com o software ARCGIS 9.3 seguido de análise de regressão ponderada geograficamente. Os resultados obtidos conduziram a valores significativos dos coeficientes de regressão entre a condutividade eléctrica e a altimetria, o pH do solo e a produtividade da pastagem, em termos de matéria seca.

<sup>1</sup> Universidade de Évora (UE), ICAAM, Departamento de Engenharia Rural, Escola de Ciências e Tecnologia, Núcleo da Mitra, 7002-554 Évora Codex.  
E-mail: jmrs@uevora.pt

**Recepção/Reception:** 2010.01.14  
**Aceitação/Acception:** 2010.02.02

**Palavras chave:** Agricultura de precisão, condutividade eléctrica aparente do solo, regressão ponderada geograficamente.

### ABSTRACT

The general objective of this study was to test a non contact electromagnetic induction probe to evaluate the soil and pasture variability in a precision agriculture project. Assessment of the variability of soil and vegetation in a permanent pasture are the basis for management of variable rate fertilization, which is the main instrument used by farmers for improvements in permanent pasture in Portugal. The traditional process of sampling and evaluation of the soil and pastures is very demanding in terms of time, labour and reagents, and can derail a project of precision agriculture. This paper describes the major steps followed by the author to simplify the methodology of soil evaluation in a permanent pasture based on measuring the apparent soil electrical conductivity. Tests were carried out in a parcel of approximately 6 hectares, which was subdivided into 28m by 28m squares. The soil and pasture samples and the evaluation of apparent electrical conductivity were georeferenced with a Global Positioning System. The geospatial data were processed by ARCGIS 9.3 software and Geographically Weighted Regression analysis, resulting in significant correlation coefficient values for apparent electrical conductivity and altimetry, soil pH and pasture dry matter yield.

**Keywords:** Precision agriculture, apparent soil electrical conductivity, geographically weighted regression.

## INTRODUÇÃO

Trabalhos de investigação anteriores mostraram que a variabilidade das características do solo numa exploração agrícola e dentro de cada parcela é de importância chave para determinar a vantagem potencial da adopção de técnicas de agricultura de precisão (King *et al.*, 2005). Contudo, muito pouco é conhecido sobre o grau desta variabilidade intra-parcelar em pastagens e forragens (Schellberg *et al.*, 2008).

A amostragem intensiva, quadrícula a quadrícula, é o método geralmente utilizado para obter a informação detalhada das características do solo (Brevik *et al.*, 2006), o que envolve trabalho intensivo de recolha e tratamento laboratorial das amostras que o tornam um processo caro (King *et al.*, 2005; Shibusawa, 2006) e impraticável à escala das explorações agrícolas (McCormick *et al.*, 2009). É, por isso, de todo o interesse encontrar outros meios, mais rápidos e práticos de obter esta informação detalhada da variabilidade do solo (King *et al.*, 2005; Brevik *et al.*, 2006). A gestão diferenciada do solo e das culturas requer meios rápidos e de baixo custo para georeferenciar as propriedades do solo com impacto na produtividade das culturas. A condutividade eléctrica aparente ( $EC_a$ ) corresponde a estas exigências (Bronson *et al.*, 2005).

A  $EC_a$  é medida a partir da indução de uma corrente electromagnética no solo (EMI) e é uma das formas mais frequentes de avaliar a variabilidade espacial das características deste (McCormick *et al.*, 2009). A  $EC_a$  é controlada por uma combinação de sais, mineralogia das argilas, teor de humidade e temperatura do solo (Brevik *et al.*, 2006). Várias referências indicam que os valores da  $EC_a$  se encontram relacionados com as propriedades do solo, parâmetros de fertilidade e também com a produtividade das culturas, pelo que a monitorização desta, em tempo real, pode representar uma ferramenta muito atractiva em agricultura de precisão (Mallarino & Wittry, 2004; Shibusawa, 2006). Netto *et al.* (2007) verificaram uma correlação significativa entre o pH e a concentração de sódio permutável no solo, e confirmaram uma correlação positiva e significativa

entre a condutividade eléctrica aparente e a concentração de sais no solo. King *et al.* (2005) utilizaram um sensor de EMI num campo experimental em dois momentos do ano, extremos em termos de humidade no solo: quando o solo se encontrava à capacidade de campo e depois da colheita, quando o solo se encontrava muito seco. Esta investigação demonstrou que o padrão de  $EC_a$  se manteve estável em ambas as situações, apesar de se verificarem diferenças significativas em termos absolutos.

Os factores que contribuem para a condutividade eléctrica do solo são também limitantes da produtividade das culturas. Foram encontradas relações significativas entre a  $EC_a$ , as características do solo e a produtividade das culturas (Johnson *et al.*, 2005), tendo estes admitido que a  $EC_a$  pode ser utilizada para identificar os gradientes de fertilidade do solo.

Com o desenvolvimento de sensores para monitorizar o solo, podem ser obtidos dados sem perturbar o solo e com maior resolução espacial do que a obtida através de métodos manuais ou laboratoriais (Dafonte, 2004; Proffitt *et al.*, 2006). O mapeamento da  $EC_a$  do solo, utilizando um sensor EMI ligado ao sistema de posicionamento global (GPS) tem merecido um interesse crescente uma vez que constitui uma ferramenta simples, relativamente barata e não invasiva para caracterizar a variabilidade intra-parcelar do solo (McCormick *et al.*, 2009).

Para além da correlação com as propriedades do solo, o mapeamento da condutividade eléctrica pode também ser utilizado para delinear zonas de gestão diferenciada (Stafford, 2006).

O objectivo geral deste estudo consistiu em testar uma sonda de indução electromagnética para avaliar a variabilidade do solo e da pastagem num projecto de agricultura de precisão.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Campo experimental

O campo experimental, com aproximadamente 6 ha, encontra-se localizado na Herdade

da Revilheira (coordenadas 38°27'51.6"N e 7°25'46.2"W), a cerca de 40 km a Nordeste de Évora, na região Alentejo (a Sul de Portugal). O solo predominante neste campo é classificado como LUVISSOL (FAO, 1998). A profundidade do solo varia entre 0,2 m nas zonas mais elevadas do campo até mais de um metro nas zonas baixas (Marques da Silva *et al.*, 2008). Em Setembro de 2000 foi estabelecida no campo experimental uma pastagem bio-diversa, pastoreada por ovinos em regime de pastoreio rotativo. O campo experimental foi sujeito a uma fertilização anual de manutenção (Superfosfato 18%) em Outubro de cada ano, com uma aplicação homogénea de 54 mg kg<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Entre 2004 e 2007 o campo foi integrado num projecto de agricultura de precisão financiado pelo governo português através do programa AGRO, com o objectivo de demonstrar novas tecnologias para aplicação diferenciada de fertilizantes. Com o apoio de um GPS-RTK Trimble 4700, o campo experimental foi dividido em 76 quadrículas, cada uma com 28 m de lado, tendo por base a largura de trabalho do distribuidor de adubo. A partir do Outono de 2004 a parcela deixou de ser fertilizada de forma homogénea, como até então, e passou a ser fertilizada de forma diferenciada, em função dos níveis de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> no solo.

### Modelo digital do terreno

O levantamento topográfico da parcela foi realizado com o GPS-RTK Trimble 4700. Os dados foram recolhidos com um veículo todo o terreno que percorreu a parcela com uma distância entre passagens de cerca de 10m. O modelo digital, representativo do relevo da parcela, foi calculado a partir da interpolação dos dados obtidos realizada no software Arc View.

### Recolha de amostras de solo e de pastagem

As amostras de solo e de pastagem foram recolhidas em cada quadrícula de 28m por 28m. As amostras foram georeferenciadas com GPS e identificadas por códigos de acor-

do com as correspondentes colunas e linhas (colunas 1-8; linhas A-J).

As amostras de solo foram recolhidas, em cada ano (entre 2004 e 2007), no final da Primavera (no final do período de crescimento das culturas) utilizando uma sonda “meia-cana” e um maço, até à profundidade de 200 mm. Cada amostra compósita resultou de 5 sub-amostras, uma recolhida no centro e as outras quatro nos cantos de cada quadrícula. O solo foi caracterizado em termos de textura, pH, teor de matéria orgânica e macronutrientes principais (azoto, fósforo e potássio).

As amostras de pastagem foram recolhidas utilizando tesouras manuais para cortar a matéria verde contida em caixas de exclusão de pastoreio com 1m<sup>2</sup> de área, pré-instaladas no canto sudoeste de cada quadrícula. Este processo foi realizado, em cada ano, entre Março e Maio, em função do desenvolvimento vegetativo da pastagem. As amostras foram guardadas em sacos de plástico e transportadas para laboratório, onde se procedeu a pesagem para determinação da matéria verde por hectare. Pequenas sub-amostras foram retiradas dos sacos de plástico e colocadas em sacos de cartão, procedendo-se de seguida à desidratação, a 65°C durante 48h, para determinar o teor de humidade respectivo. Com base neste foi calculada a produtividade da pastagem em termos de matéria seca. A restante amostra verde de cada quadrícula foi submetida a separação manual por especialistas em três grupos de plantas: gramíneas, leguminosas e outras espécies botânicas (“outras”).

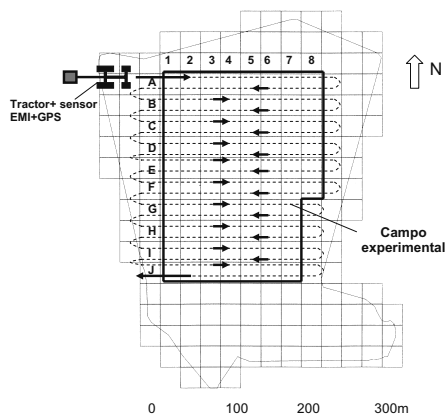
### Sonda de indução electromagnética

A sonda de indução electromagnética utilizada, modelo “Dualem 1S”, encontra-se equipada com um transmissor de um lado e com uma antena GPS do outro. O transmissor envia um sinal de corrente alterna que gera um campo electromagnético (campo magnético primário) que penetra no solo e que varia com o tempo. Este campo magnético induz pequenas correntes no solo que criam um segundo campo magnético, detectado pelo receptor. O receptor detecta ambos

os campos magnéticos e a sua relação depende da condutividade diferencial do subsolo. A intensidade do sinal é proporcional ao grau de condutividade do solo. Este sensor dual regista, simultaneamente, os dados das duas camadas de solo, neste caso a 30 e a 80 cm de profundidade. As medições são afectadas pelas condições ambientais, especialmente pela temperatura e a calibração é frequentemente necessária. Atendendo à sensibilidade deste sensor a estruturas metálicas, foi desenvolvido um veículo de quatro rodas e uma lança com 3 m de comprimento, totalmente em PVC. As medições foram realizadas a cerca de meio metro de altura da superfície do solo.

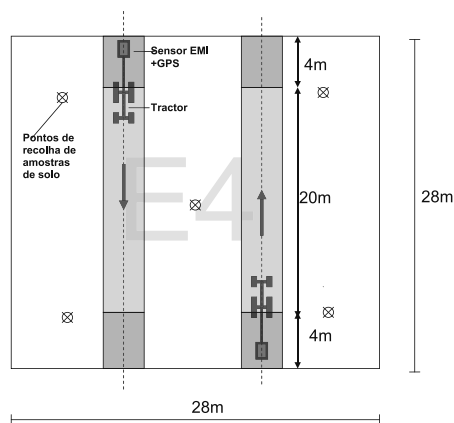
### Procedimento de campo com o sensor EMI

No final do ciclo vegetativo de 2007 (Junho), com um teor de humidade no solo de 12%, o campo foi varrido pelo sensor de indução electromagnética (EMI, “Dualem”). O sensor foi conduzido no campo experimental a uma velocidade de 5 km h<sup>-1</sup>. Cada quadrícula foi percorrida em duas passagens, em direcções contrárias (Figura 1), com um espaçamento entre passagens consecutivas de 12-14 m, considerado um aceitável compromisso em termos práticos, para campos de grandes dimensões (King *et al.*, 2005).



**Figura 1** – Procedimento utilizado no levantamento da condutividade eléctrica do solo no campo experimental.

O sensor foi programado registar a condutividade eléctrica aparente do solo com uma frequência de um segundo. No processamento dos dados foram utilizados os valores médios da condutividade eléctrica aparente do solo registados em cada quadrícula. Para o cálculo da média foi utilizado um filtro que permitiu excluir os valores registados nos primeiros e nos últimos 4m de cada quadrícula (Figura 2). Na prática, o valor médio da condutividade eléctrica aparente do solo em cada quadrícula foi obtido com base na média aritmética de cerca de 28-30 registos.



**Figura 2** – Diagrama ilustrativo do procedimento utilizado no registo da condutividade eléctrica aparente do solo em cada quadrícula.

### Tratamento estatístico

Os dados relativos à concentração dos nutrientes menos móveis do solo, como o fósforo e o potássio, têm uma validade de 3 a 5 anos e o pH é válido por 5 a 10 anos (Haneklaus, 2006). Os teores de matéria orgânica, a textura do solo e a capacidade de troca catiónica são características permanentes que necessitam ser mapeadas apenas uma vez (Haneklaus, 2006).

De acordo com Pillesjo *et al.* (2005), os teores de matéria orgânica e de argila do solo variam muito pouco, enquanto o teor de nitratos no solo varia muito rapidamente, apresentando o fósforo, o pH e o potássio uma variabilidade temporal intermédia.

Os valores médios das características estáveis do solo (pH, matéria orgânica, textura, fósforo e potássio) e a produtividade da pastagem em 2007 e na média dos 4 anos de avaliação foram comparados com os valores médios geoespacialmente correspondentes (da mesma quadricula) da condutividade eléctrica aparente do solo, em duas profundidades (30 e 80 cm). Os parâmetros menos estáveis do solo (concentração de nitratos) e a composição florística da pastagem foram comparados utilizando unicamente os valores registados no último ano (2007).

A correlação entre as diferentes variáveis foi analisada utilizando o método dos mínimos quadrados, que tem em consideração a existência ou não de multicolinearidade.

A autocorrelação espacial foi analisada nas propriedades do solo e na  $EC_a$ . Atendendo a que propriedades importantes do solo se encontram correlacionadas com outras, a análise estatística multivariada parece mais apropriada para relacionar a  $EC_a$  com a produtividade ou com múltiplas propriedades do solo. As variáveis que não apresentam multicolinearidade foram analisadas pelo software GWR (Geographically Weighted Regression) para estabelecer regressões multivaria-

das, especialmente ponderadas. Foi utilizado um nível de significância  $p < 0,05$ .

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os Quadros 1 e 2 apresentam o resumo dos valores médios e do desvio padrão das características do solo e da pastagem.

Foram encontrados importantes coeficientes de variação espacial nas propriedades do solo, especialmente nos macronutrientes (50-110%), com menor variabilidade na matéria orgânica e na textura (20-26%) e com grande estabilidade do pH e da condutividade eléctrica aparente do solo (menor que 10%). A variabilidade espacial foi igualmente importante na produtividade e na composição florística da pastagem. A condutividade eléctrica aparente do solo apresentou os seguintes valores médios:  $78 \pm 2$  mS  $m^{-1}$  a 30 cm de profundidade e  $56 \pm 7$  mS  $m^{-1}$  a 80 cm de profundidade.

A variabilidade temporal foi particularmente importante ao nível dos nitratos e do fósforo (este como resultado da fertilização anual diferenciada), e ainda ao nível da produtividade e da proporção de leguminosas na pastagem.

**Quadro 1** – Parâmetros do solo (média  $\pm$  desvio padrão) do campo experimental na camada superficial até 200 mm de profundidade (2004 – 2007).

| Parâmetros | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ,<br>mg kg <sup>-1</sup> | NO <sub>3</sub> ,<br>mg kg <sup>-1</sup> | K <sub>2</sub> O,<br>mg kg <sup>-1</sup> | Mat. Org.<br>% | Argila,<br>% | pH (H <sub>2</sub> O), |
|------------|--|--|--|----------------|--------------|------------------------|
| 2004       | 33 $\pm$ 12  | 10 $\pm$ 7                               | 94 $\pm$ 25                              | 1,7 $\pm$ 0,3  | 34 $\pm$ 6   | 6,19 $\pm$ 0,34        |
| 2005       | 42 $\pm$ 23  | 18 $\pm$ 20                              | 97 $\pm$ 16                              | 1,5 $\pm$ 0,3  | 34 $\pm$ 7   | 6,13 $\pm$ 0,28        |
| 2006       | 61 $\pm$ 55  | 32 $\pm$ 25                              | 91 $\pm$ 38                              | 1,7 $\pm$ 0,3  | 36 $\pm$ 6   | 6,12 $\pm$ 0,43        |
| 2007       | 53 $\pm$ 43  | 4 $\pm$ 2                                | 77 $\pm$ 37                              | 1,5 $\pm$ 0,4  | 35 $\pm$ 5   | 6,12 $\pm$ 0,41        |
| Média      | 47 $\pm$ 28  | 16 $\pm$ 7                               | 90 $\pm$ 25                              | 1,6 $\pm$ 0,2  | 34 $\pm$ 5   | 6,14 $\pm$ 0,34        |

**Quadro 2** – Parâmetros do solo (média  $\pm$  desvio padrão) do campo experimental na camada superficial até 200 mm de profundidade (2004 – 2007).

| Parâmetro | Matéria seca total,<br>kg ha <sup>-1</sup> | Gramíneas,<br>% | Leguminosas,<br>% | Outras espécies,<br>% |
|-----------|--|-----------------|-------------------|-----------------------|
| 2004      | 1858 $\pm$ 1045                            | 55,5 $\pm$ 21,9 | 13,2 $\pm$ 18,2   | 31,2 $\pm$ 17,9       |
| 2005      | 1395 $\pm$ 1014                            | 52,4 $\pm$ 28,3 | 0,3 $\pm$ 1,4     | 47,2 $\pm$ 28,5       |
| 2006      | 2560 $\pm$ 1491                            | 19,5 $\pm$ 12,7 | 36,9 $\pm$ 19,4   | 43,6 $\pm$ 18,0       |
| 2007      | 3532 $\pm$ 941                             | 48,9 $\pm$ 24,9 | 1,9 $\pm$ 4,9     | 49,2 $\pm$ 26,0       |
| Média     | 2407 $\pm$ 825                             | 52,1 $\pm$ 19,3 | 9,9 $\pm$ 8,0     | 38,0 $\pm$ 17,0       |

No Quadro 3 são apresentados os coeficientes de determinação entre a condutividade eléctrica aparente do solo e: a altitude, as características do solo e da pastagem.

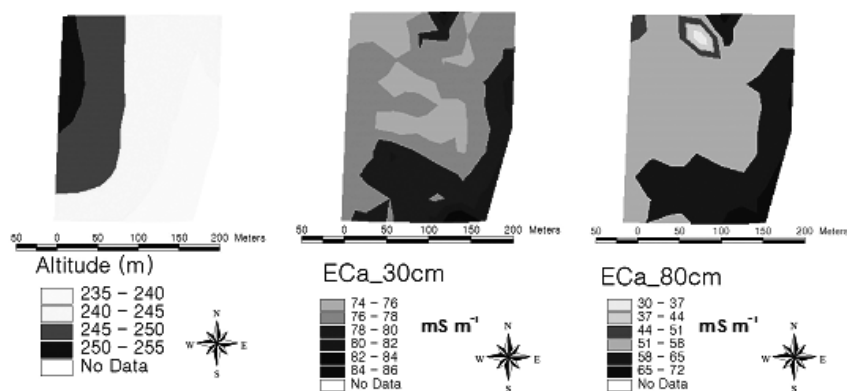
A Figura 3 mostra os mapas do relevo (altitude) e da condutividade eléctrica aparente do solo (a 30 e 80 cm de profundidade). A parcela apresenta um desnível de 20 m entre a cota mais alta e a cota mais baixa, facto que contribui decisivamente para a acentuada variabilidade espacial das características do

solo e da pastagem (Marques da Silva *et al.*, 2008). Os valores negativos e significativos dos coeficientes de correlação entre a altitude e a  $EC_a$  demonstram a esperada relação inversa entre estes dois parâmetros. A  $EC_a$  mais elevada verifica-se nas zonas mais baixas do terreno (ver Figura 3), onde os teores de humidade no solo tendem a ser, naturalmente mais elevados no final da Primavera, em condições Mediterrânicas, como mostraram Marques da Silva *et al.* (2008).

**Quadro 3** – Parâmetros do solo (média ± desvio padrão) do campo experimental na camada superficial até 200 mm de profundidade (2004 – 2007).

| Parâmetros                                    | $EC_{a-30}, mS m^{-1}$ |                    | $EC_{a-80}, mS m^{-1}$ |                    |
|---|------------------------|--------------------|------------------------|--------------------|
|   | R                      | $R^2$              | R                      | $R^2$              |
| Altitude, m                                   | <b>0,49</b>            | <b>0,24*</b>       | <b>0,53</b>            | <b>0,29*</b>       |
| <u>Parâmetros do solo</u>                     |                        |                    |                        |                    |
| $P_2O_5, mg kg^{-1}$ (média 2004-2007)        | 0,04                   | 0,00 <sup>ns</sup> | 0,05                   | 0,00 <sup>ns</sup> |
| $NO_3, mg kg^{-1}$ (2007)                     | 0,03                   | 0,00 <sup>ns</sup> | -0,06                  | 0,00 <sup>ns</sup> |
| $K_2O, mg kg^{-1}$ (média 2004-2007)          | -0,12                  | 0,02 <sup>ns</sup> | -0,12                  | 0,02 <sup>ns</sup> |
| Mat. Org., % (média 2004-2007)                | 0,06                   | 0,00 <sup>ns</sup> | -0,05                  | 0,00 <sup>ns</sup> |
| pH (média 2004-2007)                          | <b>0,57</b>            | <b>0,33*</b>       | <b>0,44</b>            | <b>0,19*</b>       |
| Argila, % (média 2004-2007)                   | -0,02                  | 0,00 <sup>ns</sup> | -0,14                  | 0,02 <sup>ns</sup> |
| <u>Parâmetros da pastagem</u>                 |                        |                    |                        |                    |
| Gramíneas, % (2007)                           | <b>0,52</b>            | <b>0,27*</b>       | <b>0,63</b>            | <b>0,40*</b>       |
| Leguminosas, % (2007)                         | -0,17                  | 0,03 <sup>ns</sup> | -0,10                  | 0,01 <sup>ns</sup> |
| Outras espécies, % (2007)                     | <b>-0,46</b>           | <b>0,21*</b>       | <b>-0,59</b>           | <b>0,35*</b>       |
| Produtividade, $kg ha^{-1}$ (2007)            | 0,06                   | 0,00 <sup>ns</sup> | 0,10                   | 0,01 <sup>ns</sup> |
| Produtividade, $kg ha^{-1}$ (média 2004-2007) | <b>0,43</b>            | <b>0,19*</b>       | <b>0,53</b>            | <b>0,28*</b>       |

R- coeficiente de correlação; R2- coeficiente de determinação, 95% confiança; \*- significativo com um nível de probabilidade de 5%; ns- não significativo;  $ECa-30$ - condutividade eléctrica aparente na camada de solo até 30 cm de profundidade;  $ECa-80$ - condutividade eléctrica aparente na camada de solo até 80 cm de profundidade.



**Figura 3** – Mapas de altitude (à esquerda), da condutividade eléctrica aparente do solo ( $EC_a$ ) a 30 cm (ao centro) e a 80 cm (à direita) de profundidade no campo experimental.

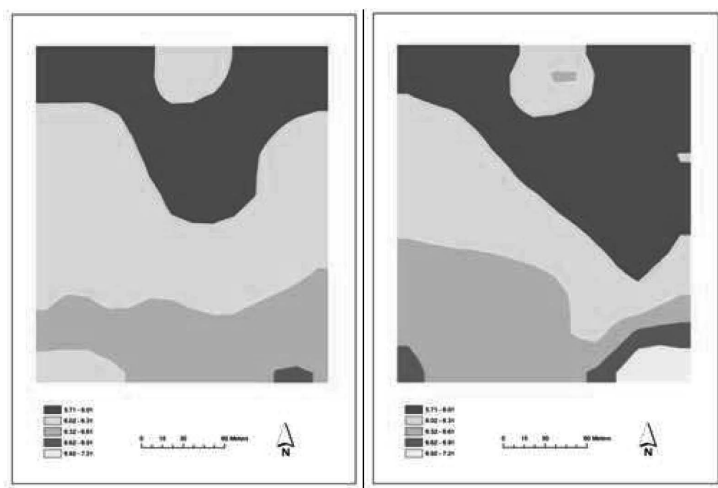
**Quadro 4** – Coeficientes “a” e “b” da equação linear do tipo  $y=a+b.EC_a$  nas correlações significativas identificadas no quadro 3.

| Parâmetros                      | a       | b       | Profundidade da $EC_a$ , cm |
|---------------------------------|---------|---------|-----------------------------|
| Altitude, m                     | 324,58  | -1,0341 | 30                          |
|                                 | 268,24  | -0,4221 | 80                          |
| pH                              | -1,2023 | 0,0943  | 30                          |
|                                 | 4,6117  | 0,0267  | 80                          |
| Gramíneas (2007)                | -447,35 | 6,3484  | 30                          |
|                                 | -143,01 | 3,2923  | 80                          |
| Outras espécies (2007)          | 513,15  | -5,9353 | 30                          |
|                                 | 235,18  | -3,1909 | 80                          |
| Produtividade média (2004-2007) | -11370  | 176,26  | 30                          |
|                                 | -2938,2 | 91,715  | 80                          |

O Quadro 4 mostra as equações de regressão e os respectivos coeficientes de determinação para as correlações significativas apresentadas no Quadro 3.

A Figura 4 compara, através de mapas de distribuição, os valores de pH estimados a partir das equações com melhores coeficientes de determinação ( $EC_{a-30}$ ), com os valores medidos no campo experimental. A Figura 5 compara, através de mapas de distribuição, os valores da produtividade da pastagem em termos de matéria seca, estimados a partir das equações com melhores coeficientes de determinação ( $EC_{a-80}$ ), com os valores me-

ditos no campo experimental. Estas figuras permitem verificar uma boa e significativa correlação entre o pH do solo e a condutividade eléctrica do solo e também entre a produtividade da pastagem e a condutividade eléctrica do solo. Como foi observado por Marques da Silva *et al.* (2008), as áreas com maior produtividade da pastagem situam-se nas zonas baixas da parcela, perto da linha de escoamento de água do solo, consequentemente, onde os níveis de humidade são mais elevados, a que também correspondem valores mais elevados de condutividade eléctrica aparente do solo e do pH. Estes resultados



**Figura 4** – Mapas ilustrativos da distribuição dos valores do pH: à esquerda, valores estimados utilizando as equações de regressão estabelecidas com base na medição da condutividade eléctrica aparente do solo; à direita, valores observados.

estão de acordo com os apresentados por Netto *et al.* (2007), que verificaram correlações significativas entre o pH e a condutividade eléctrica aparente do solo, e por Klar (1988) que mostrou o efeito do pH no desenvolvimento das culturas. Este aspecto é particularmente importante uma vez que a amplitude do pH no campo experimental variou entre 5,49 e 8,02, com efeito diferenciado na disponibilidade do fósforo no solo, macronutriente fundamental para o desenvolvimento das pastagens. Este é, também, o principal nutriente fornecido às pastagens em extensivo da região do Alentejo. Segundo King *et al.* (2005) a medição da  $EC_a$  encontra-se directamente dependente de algumas propriedades do solo, enquanto a produtividade das culturas reflecte a resposta integrada destas às propriedades do solo mais importantes para o seu crescimento (King *et al.*, 2005).

Tendo por base os estudos publicados, esperar-se-ia uma boa correlação entre a  $EC_a$  e os parâmetros que permanecem relativamente estáveis no solo ao longo dos anos, como o pH, os teores de matéria orgânica e os teores de argila no solo. O estabelecimento de regressões com o software GWR, entre a condutividade eléctrica aparente do solo a duas profundidades (30 e 80 cm) (ver Quadro 4) e algumas características físicas e químicas do solo e a produtividade da pastagem apenas revelou coeficientes de determinação aceitáveis e significativos com o pH e com a produtividade da pastagem (respectivamente 0,33 e 0,19 para o pH e 0,19 e 0,28 para a produtividade da pastagem, a 30 e a 80 cm de profundidade, respectivamente). Um dos aspectos que pode ter condicionado a correlação da condutividade eléctrica com outras propriedades do solo tem a ver com a diferente camada de solo avaliada. Enquanto as amostras de solo foram recolhidas até à profundidade de 200 mm, as medições da sonda de indução magnética “Dualem” abrangeram a camada de solo até 300 mm ou 800 mm de profundidade. Este aspecto é particularmente relevante nas zonas altas da parcela, onde a profundidade do solo arável é reduzida; nestes casos a sonda poderá estar, às profundida-

des indicadas de medição, a medir a condutividade eléctrica da rocha mãe, a qual tem um efeito diverso sobre estes parâmetros.

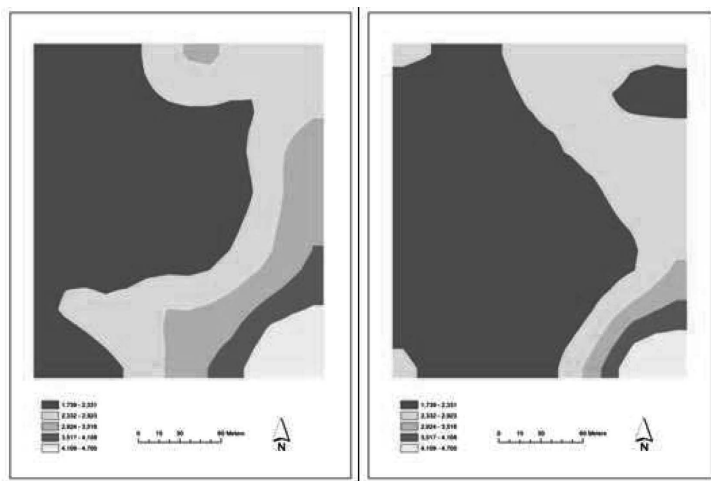
Apesar de estudos prévios terem demonstrado que o teor de humidade do solo não altera o padrão básico da  $EC_a$  do solo (King *et al.*, 2005), poderá ser interessante repetir este ensaio na altura em que o solo se encontra com teores elevados de humidade, já que a maioria dos estudos publicados refere a influência da humidade do solo na condutividade eléctrica aparente do solo.

Ainda no que se refere a parâmetros instáveis, foi identificada uma correlação significativa entre a  $EC_a$  e os níveis de gramíneas e outras espécies na pastagem (coeficientes de determinação entre 0,21 e 0,40), a primeira com uma correlação positiva e a segunda com uma correlação negativa. As gramíneas tendem a desenvolver-se particularmente nas zonas baixas da parcela, onde coincidem elevados teores de humidade e de condutividade eléctrica aparente do solo, enquanto nas zonas altas e nas zonas de declive acentuado da parcela, se verifica um desenvolvimento preferencial das espécies botânicas espontâneas (designadas como “outras espécies”), adaptadas às condições difíceis associadas com a Primavera relativamente seca dos climas Mediterrânicos. A ausência de leguminosas na pastagem em 2007 (ver Quadro 2) reflectiu-se, naturalmente, numa baixa e não significativa correlação com a condutividade eléctrica do solo.

Estes resultados indicam a possibilidade de utilizar a sonda de indução electromagnética do solo como ferramenta para monitorizar não unicamente as características do solo, mas também da pastagem, o que pode representar uma importante ajuda na simplificação do processo de amostragem e apoio à tomada de decisão na gestão diferenciada em projectos de agricultura de precisão.

Interessa, no entanto, deixar uma nota de reserva. A chave do sucesso futuro da agricultura de precisão não passa unicamente por recolher dados, é necessário converter estes dados em informação útil e, posteriormente, tomar decisões rigorosas que avaliem os ris-





**Figura 5** – Mapas ilustrativos da distribuição da produtividade da pastagem, em termos de matéria seca (kg ha<sup>-1</sup>): à esquerda, valores estimados utilizando as equações de regressão estabelecidas com base na medição da condutividade eléctrica aparente do solo; à direita, valores observados.

cos e os benefícios envolvidos. Será necessário ainda desenvolver sistemas robustos de apoio à tomada de decisão, no sentido de aumentar a aplicabilidade da agricultura de precisão também às pastagens e forragens (Schellberg *et al.*, 2008).

## CONCLUSÕES

Os resultados deste estudo mostram que a condutividade eléctrica aparente do solo, medida pelo sensor de indução electromagnética Dualem, se correlaciona positiva e significativamente com o pH e com a produtividade da pastagem, em termos de matéria seca, e apresenta uma correlação negativa e significativa com a altitude. Os coeficientes de determinação obtidos (respectivamente: 0,33; 0,28 e 0,29) demonstram o potencial destes sensores para, em ligação com os sistemas de posicionamento por satélite, efectuarem o levantamento de algumas características do solo relacionadas com a sua fertilidade e para estimarem a produtividade da pastagem.

Contrariamente ao que é apresentado em muitos trabalhos publicados foi encontrada

uma correlação não significativa entre a condutividade eléctrica aparente e outras características do solo, nomeadamente os teores de argila e a concentração de macronutrientes no solo.

## AGRADECIMENTOS

Ao programa AGRO do governo português, pelo financiamento do projecto 390.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Brevik, E.; Fenton, T., Lazari, A. (2006) - Soil electrical conductivity as a function of soil water content and implications for soil mapping. *Precision Agriculture* 7: 393-404.
- Bronson, K.; Booker, J.; Officer, S.; Lascano, R.; Maas, S.; Searcy, S., Booker, J. (2005) - Apparent electrical conductivity, soil properties and spatial covariance in the U.S. Southern High Plains. *Precision Agriculture* 6: 297-311.
- Dafonte, J. D. (2004) - Sensores basados en la medida de la conductividad eléctrica

- ca para evaluar las propiedades del suelo y su aplicación en agricultura de precisión. *Proceedings of the II Jornadas sobre Agricultura de Precisión*. Universidad A Coruña, Espanha, 15-17 julio 2004, 56-63.
- FAO (1998) - *World reference base for soil resources*. World Soil Resources Report nº84. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome.
- Haneklaus, S. (2006) - Site-specific nutrient management: objectives, current status, and future research needs. In: Srinivasan, A. (Ed.) *Handbook of precision agriculture, principles and applications*, pp. 91-270.
- Johnson, C.; Eskridge, K., Corwin, D. (2005) - Apparent soil electrical conductivity: applications for designing and evaluating field-scale experiments. *Computers and Electronics in Agriculture* 46: 181-202.
- 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* 6: 167-181.
- Klar, A.E. (1988) - *A água no sistema solo-planta-atmosfera*. 2ª ed., S. Paulo, Brasil, 408 pp.
- Mallarino, A. P., Wittry, D. J. (2004) - Efficacy of grid and zone soil sampling approaches for site-specific assessment of phosphorus, potassium, pH, and Organic Matter. *Precision Agriculture* 5: 131-144.
- Marques da Silva, J. R.; Peça, J. O.; Serano, J. M.; Carvalho, M. J. & Palma, P. M. (2008) - Evaluation of spatial and temporal variability of pasture based on topography and the quality of the rainy season. *Precision Agriculture* 9: 209-229.
- McCormick, S.; Jordan, C., Bailey, J. (2009) - Within and between-field spatial variation in soil phosphorus in permanent grassland. *Precision Agriculture* 10: 262-276.
- Netto, A. O. A.; Gomes, C. C. S.; Lins, C. C. V.; Barros, A. C.; Campeche, L. F. S. M., Blanco, F. F. (2007) - Características químicas e salino-sodicidade dos solos do perímetro irrigado Califórnia, SE, Brasil. *Ciência Rural*, Santa Maria, 37: 1640-1645.
- Pillesjo, P.; Thylén, L. & Persson, A. (2005) - Topographical data for delineation of agricultural management zones. *Proceedings of the Precision Agriculture Congress*, pp. 819-826.
- Proffitt, T.; Bramley, R.; Lamb, D., Winter, E. (2006) - *Soil sensing in precision viticulture- A new era in vineyard management and wine production*. Winetitle Ed., pp.51-55.
- Schellberg, J.; Hill, M. J.; Gerhards, R.; Rothmund, M., Braun, M. (2008) - Precision agriculture on grassland: Applications, perspectives and constraints. *European Journal of Agronomy* 29: 59-71.
- Shibusawa, S. (2006) - Soil sensors for precision farming. In: *Handbook of precision agriculture, principles and applications*. Ancha Srinivasan Editor, pp. 57-90.
- Stafford, J. (2006) - The role of technology in the emergence and current status of precision agriculture. In: Srinivasan, A. (Ed.) *Handbook of precision agriculture, principles and applications*, pp. 19-56.