

# Revista de Ciências Agrárias

VOLUME XXVIII / NÚMERO 2 / 2005

ENCONTRO ANUAL  
Sociedade Portuguesa da Ciência do Solo

## “O Solo - Factor de Qualidade Ambiental”

Integrado nas Comemorações do Centenário da Sociedade de Ciências Agrárias de Portugal

Coimbra

10 a 12 de Julho de 2003

**Edição Especial**

Sociedade de Ciências Agrárias de Portugal

Fundada em 1903 / Lisboa / Portugal

Efeito do posicionamento da necromassa de herbáceas no processo de decomposição e libertação de nutrientes .....	245
<i>C. Sá, M. Madeira &amp; L. Gazarini</i>	
Produção e decomposição de folhas da folhada de <i>Quercus suber</i> L. e <i>Q. rotundifolia</i> Lam.....	257
<i>C. Sá, M. Madeira &amp; L. Gazarini</i>	
Acção do fungo nematófago <i>Pochonia chlamydosporia</i> (= <i>Verticillium chlamydosporium</i> ) sobre os nemátodes-das-galhas-radulares, <i>Meloidogyne</i> spp., em horticultura protegida.....	273
<i>I. Abrantes, S. Santos, C. Vieira dos Santos, I. Clara, C. Franco, L. Vinagre, J. Fernandes, E. Neto, N. Ramos, L. Ramalheite, A. Sottomayor, J. Heitor &amp; A. Pinto</i>	
Dinâmica foliar de nutrientes em <i>Cistus salvifolius</i> L. e sua influência nas características do solo. ....	282
<i>M. P. Simões, M. Madeira &amp; L. Gazarini</i>	

## SISTEMAS DE USO DA TERRA E GESTÃO SUSTENTÁVEL DE RECURSOS

Avaliação do efeito da sombra e da adição de nutrientes na biomassa de vegetação herbácea num lameiro do Nordeste de Portugal.....	297
<i>E. L. Pereira, M. Madeira &amp; M. L. Monteiro</i>	
Simulação lisimétrica da gestão de folhada de <i>Pinus pinaster</i> . Efeito na lixiviação de nutrientes e nas características químicas do solo. ....	312
<i>F. Raimundo, M. Madeira, J. Coutinho &amp; A. Martins</i>	
Fluxos de nutrientes em árvores de montado de <i>Quercus rotundifolia</i> Lam., no Sul de Portugal.....	328
<i>J. Nunes, M. Madeira &amp; L. Gazarini</i>	
Variabilidade espacial de características químicas do solo: relações com a topografia do terreno e com a produtividade do milho.....	343
<i>J. R. Marques da Silva &amp; C. Alexandre</i>	

## RESÍDUOS, EFLUENTES E QUALIDADE AMBIENTAL

Métodos químicos expeditos para previsão da disponibilidade de azoto para a cultura do azevém, a partir da mineralização de resíduos orgânicos aplicados ao solo.....	355
<i>C. M. d. S. Cordovil, J. Coutinho &amp; F. Cabral</i>	
Avaliação do grau de maturação de compostados de lamas de ETAR da indústria têxtil com outros resíduos orgânicos.....	370
<i>M. Costa, J. Oliveira, A. Fernandes, E. Leandro, M. Cunha &amp; M. Russo</i>	
Será a presença de alguns compostos orgânicos poluentes, na lama da ETAR de Évora, uma limitação para aplicação em solos agrícolas?.....	380
<i>M. G. Serrão, H. Domingues, P. Viana, J. C. Martins &amp; M.L. Fernandes</i>	
Produção de folhada e devolução de nutrientes ao solo em povoamentos de <i>Eucalyptus globulus</i> e de <i>Pinus pinaster</i> .....	389
<i>N. Cortez, M. Madeira, A. Martins &amp; A. Fabião</i>	

# Variabilidade espacial de características químicas do solo: relações com a topografia do terreno e com a produtividade do milho

## Spatial variability of soil chemical characteristics: relationships with field topography and maize productivity

J.R. Marques da Silva<sup>1</sup> & C. Alexandre<sup>2</sup>

### RESUMO

Com este trabalho pretende-se: analisar a variabilidade espacial de propriedades químicas da camada arável do solo (<25 cm), concretamente, o fósforo e potássio extraíveis, o pH, o cálcio, magnésio e potássio de troca e a capacidade de troca catiónica; avaliar a estratégia de amostragem adoptada; pesquisar as relações existentes entre as características químicas do solo, a topografia do terreno e a produtividade, considerando também as respectivas implicações para a nutrição vegetal. Este estudo iniciou-se em Agosto de 2001, incidindo sobre uma área de cerca de 15 ha, localizada numa exploração agrícola na região Alentejo, Terena, 80 km a Este de Évora, onde se pratica a cultura de milho regado com rampa de rega rotativa há cerca de 10 anos. Efectuou-se um levantamento da topografia do terreno com um sistema de posicionamento global (GPS), adoptando uma densidade de amostragem de 5 m na linha e 15 m na entrelinha. Foram amostrados 1111 pontos para a medição da produtividade, utilizando para isso uma ceifeira com um "kit" de agricultura de precisão. Recolheram-se 109 monólitos de solo até uma pro-

fundidade no máximo de 120 cm, recorrendo a uma sonda mecânica e adoptando amostragem sistemática numa malha de aproximadamente regular. Os solos observados são maioritariamente Regossolos e Cambissolos Calcários, com alguns Luvisolos e Fluvisolos. Verificou-se que o reconhecimento da distribuição espacial de nutrientes no solo requer diferentes técnicas de amostragem, que se devem adequar ao comportamento de cada nutriente no solo e às práticas culturais utilizadas em cada exploração. Comprovou-se, também, que as propriedades químicas do solo estudadas sofrem importantes variações no espaço, com efeitos potencialmente significativos sobre a produtividade das culturas, por exemplo, verificamos que a amplitude da concentração de potássio de troca poderá ser superior a 9 vezes em locais relativamente próximos. Estas variações são apenas parcialmente dependentes das variáveis topográficas consideradas. A variação das características químicas do solo e da topografia têm consequências imediatas ao nível da produtividade da cultura e consequentemente deveria ter também implicações ao nível da nutrição vegetal, o que vulgarmente não acontece.

<sup>1</sup> Univ. de Évora, Dep. de Engenharia Rural, Ap. 94, 7002-554 Évora email: [jmsilva@uevora.pt](mailto:jmsilva@uevora.pt)

<sup>2</sup> Universidade de Évora, Dep. de Geociências, Apartado 94, 7002-554 Évora

## ABSTRACT

This work is intended to: study spatial variability of soil chemical properties, namely, extractable phosphorous and potassium, pH, exchangeable calcium, magnesium and potassium, and cationic exchangeable capacity on the arable layer (<25 cm); evaluate the sample methodology adopted; and to determine the relationship between three main variables: soil parameters, topography and corn yield. This study started in August 2001, in a farm located in the Alentejo region of Portugal, at Terena, near Alandroal, 80 km east of Évora. It was used an area of 15 ha in a single plot of irrigated cropland under center pivot corn production for the last 10 years. Field topography was sampled with a global position system (GPS), using a density of 5 m in the row and 15 m in the inter-row. Corn productivity was measured in 1111 points with precision agriculture equipment. Using a mechanical probe, 109 soil monoliths of 120 cm depth, at maximum, were collected based on systematic sampling of an approximately regular network. Soils are mainly Regosols and Calcic Cambisols, with some Luvisols and Fluvisols. It is showed that spatial survey of soil nutrients requires different soil sampling methodologies, which must take in account nutrients behaviour and recent agricultural management history. It is, also, proved that studied soil chemical properties have significant spatial variations, which may have important consequences for crop productivity, i.e. exchangeable potassium levels can be multiplied by 9 in relatively short distances. These spatial variations were just partially explained by studied topographical variables. Spatial variability of soil chemical properties and field topography have potentially consequences on crop productivity and, accord-

ingly they should be considered for plant nutrition management which it seldom the case.

## INTRODUÇÃO

As características do solo desempenham um papel fundamental no crescimento das culturas e na sua produtividade. Em regiões com uma topografia complexa, a mesma expressão dos restantes factores de formação do solo traduz-se, normalmente, em solos com características muito diversas consoante a sua localização topográfica. Muitas propriedades do solo são dependentes umas das outras e, por isso, é fácil reconhecer que processos como a drenagem superficial e subsuperficial, com as suas implicações, por exemplo, na erosão/deposição e no regime hídrico dos solos, se possam reflectir em múltiplas características do solo, como é o caso da sua espessura efectiva e da textura, porosidade, composição mineralógica e capacidade de troca catiónica dos seus horizontes constituintes. A variabilidade espacial do solo tem implicações para vários tipos de uso, com relevo para a agricultura, colocando problemas de gestão a todos os níveis em que esta interfere com o solo.

Os modelos de crescimento de culturas têm sido largamente utilizados na análise de problemas espaciais tais como: (i) diagnóstico de factores que condicionam a produção, como por exemplo, variação nas propriedades de solo, infestantes e doenças de solo (Paz *et al.*, 1999); (ii) avaliação de diferentes opções na gestão de nutrientes ao nível da parcela de forma a aumentar o lucro e minimizar a perda de nutrientes para o meio ambiente (Paz, 2000); (iii) previsão da produtividade numa determinada parcela, à medida que a estação avança, considerando um solo com variabilidade

(versão postprint)

## **Variabilidade espacial de características químicas do solo: relações com a topografia do terreno e com a produtividade do milho**

### **Spatial variability of soil chemical characteristics: relationships with field topography and maize productivity**

**J. R. Marques da Silva<sup>1</sup> & C. Alexandre<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Universidade de Évora, Dep. de Engenharia Rural, Apartado 94, 7002-554 Évora*  
email: [jmsilva@uevora.pt](mailto:jmsilva@uevora.pt)

<sup>2</sup> *Universidade de Évora, Dep. de Geociências, Apartado 94, 7002-554 Évora*

#### **RESUMO**

Com este trabalho pretende-se: analisar a variabilidade espacial de propriedades químicas da camada arável do solo (<25 cm), concretamente, o fósforo e potássio extraíveis, o pH, o cálcio, magnésio e potássio de troca e a capacidade de troca catiónica; avaliar a estratégia de amostragem adoptada; pesquisar as relações existentes entre as características químicas do solo, a topografia do terreno e a produtividade, considerando também as respectivas implicações para a nutrição vegetal. Este estudo iniciou-se em Agosto de 2001, incidindo sobre uma área de cerca de 15 ha, localizada numa exploração agrícola na região Alentejo, Terena, 80 km a Este de Évora, onde se pratica a cultura de milho regado com rampa de rega rotativa há cerca de 10 anos. Efectuou-se um levantamento da topografia do terreno com um sistema de posicionamento global (GPS), adoptando uma densidade de amostragem de 5 m na linha e 15 m na entrelinha. Foram amostrados 1111 pontos para a medição da produtividade, utilizando para isso uma ceifeira com um “kit” de agricultura de precisão. Recolheram-se 109 monólitos de solo até uma profundidade no máximo de 120 cm, recorrendo a uma sonda mecânica e adoptando amostragem sistemática numa malha de aproximadamente regular. Os solos observados são maioritariamente Regossolos e Cambissolos Calcários, com alguns Luvisolos e Fluvisolos. Verificou-se que o reconhecimento da distribuição espacial de nutrientes no solo requer diferentes técnicas de amostragem, que se devem adequar ao comportamento de cada nutriente no solo e às práticas culturais utilizadas em cada exploração. Comprovou-se, também, que

as propriedades químicas do solo estudadas sofrem importantes variações no espaço, com efeitos potencialmente significativos sobre a produtividade das culturas, por exemplo, verificamos que a amplitude da concentração de potássio de troca poderá ser superior a 9 vezes em locais relativamente próximos. Estas variações são apenas parcialmente dependentes das variáveis topográficas consideradas. A variação das características químicas do solo e da topografia têm consequências imediatas ao nível da produtividade da cultura e conseqüentemente deveria ter também implicações ao nível da nutrição vegetal, o que vulgarmente não acontece.

### **ABSTRACT**

This work is intended to: study spatial variability of soil chemical properties, namely, extractable phosphorous and potassium, pH, exchangeable calcium, magnesium and potassium, and cationic exchangeable capacity on the arable layer (<25 cm); evaluate the sample methodology adopted; and to determine the relationship between three main variables: soil parameters, topography and corn yield. This study started in August 2001, in a farm located in the Alentejo region of Portugal, at Terena, near Alandroal, 80 km east of Évora. It was used an area of 15 ha in a single plot of irrigated cropland under center pivot corn production for the last 10 years. Field topography was sampled with a global position system (GPS), using a density of 5 m in the row and 15 m in the inter-row. Corn productivity was measured in 1111 points with precision agriculture equipment. Using a mechanical probe, 109 soil monoliths of 120 cm depth, at maximum, were collected based on systematic sampling of an approximately regular network. Soils are mainly Regosols and Calcaric Cambisols, with some Luvisols and Fluvisols. It is showed that spatial survey of soil nutrients requires different soil sampling methodologies, which must take in account nutrients behaviour and recent agricultural management history. It is, also, proved that studied soil chemical properties have significant spatial variations, which may have important consequences for crop productivity, i.e. exchangeable potassium levels can be multiplied by 9 in relatively short distances. These spatial variations were just partially explained by studied topographical variables. Spatial variability of soil chemical properties and field

topography have potentially consequences on crop productivity and, accordingly they should be considered for plant nutrition management which it seldom the case.

## INTRODUÇÃO

As características do solo desempenham um papel fundamental no crescimento das culturas e na sua produtividade. Em regiões com uma topografia complexa, a mesma expressão dos restantes factores de formação do solo traduz-se, normalmente, em solos com características muito diversas consoante a sua localização topográfica. Muitas propriedades do solo são dependentes umas das outras e, por isso, é fácil reconhecer que processos como a drenagem superficial e subsuperficial, com as suas implicações, por exemplo, na erosão/deposição e no regime hídrico dos solos, se possam reflectir em múltiplas características do solo, como é o caso da sua espessura efectiva e da textura, porosidade, composição mineralógica e capacidade de troca catiónica dos seus horizontes constituintes. A variabilidade espacial do solo tem implicações para vários tipos de uso, com relevo para a agricultura, colocando problemas de gestão a todos os níveis em que esta interfere com o solo.

Os modelos de crescimento de culturas têm sido largamente utilizados na análise de problemas espaciais tais como: (i) diagnóstico de factores que condicionam a produção, como por exemplo, variação nas propriedades de solo, infestantes e doenças de solo (Paz *et al.*, 1999); (ii) avaliação de diferentes opções na gestão de nutrientes ao nível da parcela de forma a aumentar o lucro e minimizar a perda de nutrientes para o meio ambiente (Paz, 2000); (iii) previsão da produtividade numa determinada parcela, à medida que a estação avança, considerando um solo com variabilidade espacial e a existência de dados meteorológicos actualizados ao dia (Seidl *et al.*, 2001).

Os modelos de crescimento de culturas requerem um número de parâmetros de solo que terão que ser medidos ou estimados. A medição sistemática dos parâmetros do solo necessários, segundo uma determinada matriz aplicada a uma parcela, é uma tarefa pouco prática e muito dispendiosa. São necessários, por isso, métodos de estimação expeditos, que tornem relativamente acessíveis a obtenção de mapas para os modelos de crescimento de culturas e outras aplicações. A obtenção deste tipo de mapas passa por uma amostragem representativa da variável em estudo, procurando-se que o somatório do erro quadrado médio dos resíduos seja o mais reduzido possível. A estimativa das

características físicas, químicas e biológicas do solo seria facilitada caso estas se relacionassem com variáveis mais fáceis de obter, como a topografia do terreno.

Este trabalho tem como principais objectivos: (1) analisar a variabilidade espacial de propriedades químicas do solo relevantes para a nutrição vegetal, concretamente, o fósforo e potássio extraíveis, pH, cálcio, magnésio e potássio de troca e a capacidade de troca catiónica; (2) avaliar a estratégia de amostragem adoptada para a caracterização edáfica e a qualidade das cartas produzidas; (3) pesquisar eventuais relações das características do solo com variáveis quantitativas da topografia do terreno e com a produtividade da cultura praticada na área em estudo, considerando também as respectivas implicações para a nutrição vegetal.

## MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo iniciou-se em Agosto de 2001 e localiza-se na região Alentejo, Terena, Alandroal, 80 km a Este de Évora, numa área de relevo ondulado (0-10% de declive), onde se pratica a cultura de milho regada por rampa rotativa desde 1994. A área de estudo tem uma longa história de uso agrícola com intensificação crescente últimos anos de utilização (Quadro 1).

**QUADRO 1 – História da utilização do solo na parcela em questão**

presente	Milho de regadio (rampa rotativa)
-	Gradagem com grade de discos pesada até à profundidade de 15-20 cm
1994	Lavoura com charrua até à profundidade de 25-35 cm
	Escarificação até à profundidade de 10-15 cm
1994	Cereais de sequeiro (Girassol x Trigo x Cevada)
-	Lavoura com charrua no girassol até à profundidade de 25-35 cm
1985	Escarificação nas outras culturas até à profundidade de 10-15 cm

A área de trabalho tem aproximadamente 15 ha com uma topografia bastante ondulada (1-27% com 10% de declive médio). Os solos nesta área são maioritariamente Regossolos e Cambissolos Calcários, surgem também alguns Luvisolos e, minoritariamente, Fluvisolos (FAO *et al.* 1998). Os materiais originários dominantes são: calcário, calcário associado a xisto, xisto e depósitos coluviais. O calcário e calcário associado a xisto surgem principalmente nas cumeadas e na parte superior das

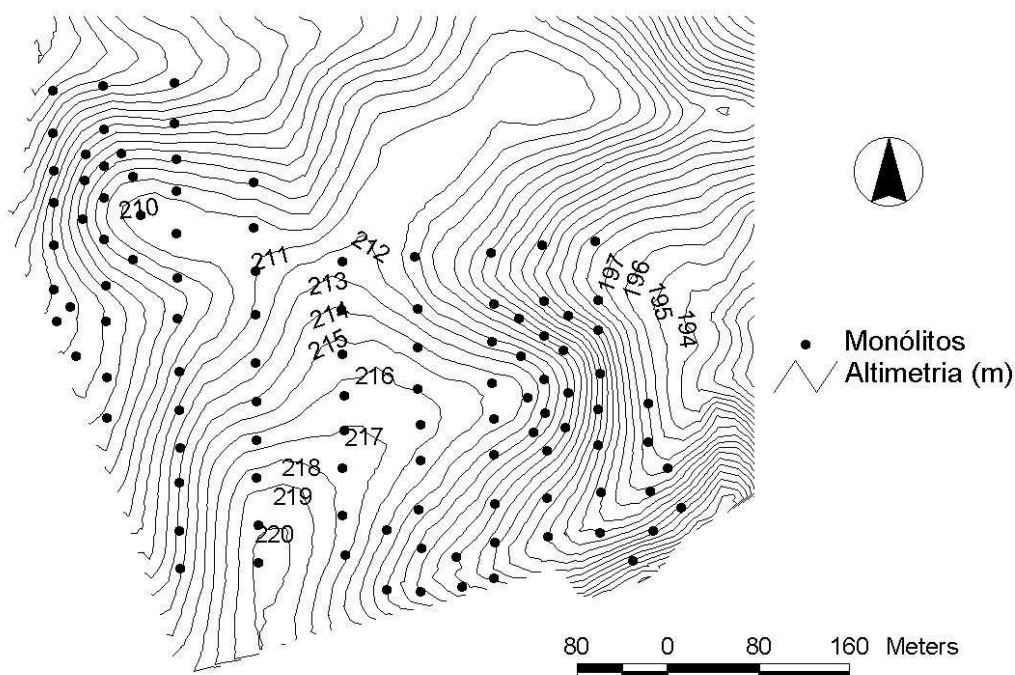


encostas. O xisto ocorre essencialmente em zonas de meia-encosta e também na base de algumas encostas. Os depósitos coluviais, com textura média a fina, por vezes carbonatados, outras vezes com proporção elevada de elementos grosseiros, estão associados às linhas de água (Alexandre *et al.*, 2002).

Utilizou-se um sistema de posicionamento global (GPS) Trimble RTK / PP - 4700 com uma precisão planimétrica e altimétrica inferior a 0,02 m e 0,04 m, respectivamente, para efectuar: a) a carta topográfica da área regada (Figura 1); b) o posicionamento dos monólitos de solo recolhidos (Figura 1); c) a medição da produtividade instantânea.

### **Carta topográfica**

A metodologia que esteve na base da elaboração da carta topográfica e do seu modelo digital teve por base os seguintes passos: (i) levantamento topográfico efectuado com GPS considerando uma densidade de amostragem de 5 m na linha e de 15 m na entrelinha, (ii) importação das coordenadas (x, y, z) dos pontos levantados, para o software “ArcView” (ESRI, 1999); (iii) com estes pontos, não visíveis na Figura 1 de forma a evitar a sobrecarga da mesma, foi calculada uma rede irregular de triângulos (“TIN” do software “ArcView” (ESRI, 1999)) que permitiu calcular as curvas de nível presentes na Figura 1 e o modelo de elevação numérico num formato quadricular, com uma resolução da quadrícula de 1 m, através da extensão “Spatial Analyst”. Não se elaborou nenhuma análise geoestatística da variável topográfica devido à grande densidade de pontos recolhidos



**Figura 1** – Topografia da zona de estudo com os locais onde os monólitos de solo foram amostrados

Sobre o anterior modelo de elevação numérico foi calculado o declive em percentagem (D), a área contributiva específica de escoamento a montante de um determinado ponto em metros (ACe), a curvatura (Curv) e o índice de humedecimento de Moore (IM) ('wetness index', Moore *et al.*, 1993). A ACe, calculada no modelo digital de terreno, é a área a montante de uma determinada célula elementar, ou quadrícula, que drena para essa célula (área contributiva) dividida pela largura da célula (no caso presente a área contributiva e a área contributiva específica coincidem, dado que se usou uma quadrícula de 1 m<sup>2</sup>). O IM é calculado pela seguinte equação:  $IM = \ln(ACe/D \cdot 100)$  onde Ln é o logaritmo neperiano. Quanto maior a área contributiva específica e menor o declive de um dado ponto do terreno, maior será a tendência para esse ponto permanecer com teores de humidade mais elevados. O declive e a curvatura consistem respectivamente na primeira e segunda derivadas do modelo numérico do relevo. Valores de curvatura negativos indicam formas de relevo convexas e valores de curvatura positivos indicam formas de relevo côncavas.

### **Amostragem do solo**

Na zona de estudo foram recolhidos 109 monólitos de solo (Figura 1). O levantamento dos monólitos de solo teve por base a carta de produtividade (Figura 2). Conhecendo a variabilidade espacial da produtividade, delineou-se a amostragem dos monólitos de solo para que as zonas de muito baixa e muito alta produtividade fossem amostradas mais densamente numa malha relativamente regular e sistemática. Cada monólito de solo foi recolhido por um cilindro de 9,5 cm de diâmetro até a um máximo de 120 cm de profundidade. As características de solo utilizadas neste estudo foram obtidas por análise de amostras do horizonte superficial (<0.25 cm) tendo em conta as seguintes metodologias: fósforo ( $P_2O_5$ ) e potássio ( $K_2O$ ) extraíveis pelo método de Egnér-Riehm; pH em água por medição com potenciómetro numa suspensão 1:2,5; cálcio (Ca), magnésio (Mg) e potássio (K) de troca pelo método do acetato de amónio a pH 7,0 e a capacidade de troca catiónica (CTC) igualmente pelo método do acetato de amónio a pH 7,0.

### **Determinação da produtividade**

Utilizou-se uma ceifeira CASE com um sistema de aquisição de dados que monitorizou de uma forma pontual a produtividade (Prod) instantânea e a humidade do grão. A produtividade e a humidade foram por sua vez georreferenciadas com um DGPS Trimble RTK / PP - 4700. Foram amostrados de forma irregular respectivamente 1111 pontos de produtividade na área de estudo.

Os dados da produtividade e das características do solo foram analisados para verificar a existência e, se necessário, a eliminação da correlação com a posição (Desmet, 1997). A análise dos semivariogramas (Quadro 2) e da krigagem (Soares, 2000) foi realizada com a extensão de geoestatística do sistema de informação geográfica ArcGIS (ESRI, 2001).

Para o ajustamento e selecção dos modelos de variogramas consideraram-se os seguintes critérios: a) erro médio perto de zero; b) raiz quadrada do erro quadrado médio e erro padrão médio o mais baixos possíveis e c) raiz quadrada do erro padrão médio perto da unidade. As superfícies da produtividade e das variáveis do solo foram criadas por interpolação, com 1 m de resolução, usando o estimador de krigagem.

**QUADRO 2 - Sumário dos resultados obtidos na análise dos semivariogramas (todas as variáveis foram melhor representadas por um modelo esférico)**

Variável	†	Efeito pepita (C0)	Patamar (C)	(C+C0)	Semi-Eixo Maior (m)	Semi-Eixo Menor (m)	Ângulo (°)
Produtividade (t/ha)	*	11,100	14,850	25,950	288	170	136,0
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg kg <sup>-1</sup> ) • 2ª ordem	1212,0	1572,1	2784,1	198	113	72,6	• K <sub>2</sub> O (mg kg <sup>-1</sup> ) K <sub>2</sub> O (mg kg <sup>-1</sup> )
CTC (cmol(+) kg <sup>-1</sup> )	2ª ordem	119,330	70,268	189,598	198	68	278,8
Ca (cmol(+) kg <sup>-1</sup> )	2ª ordem	83,950	108,170	192,120	198	87	271,5
Mg (cmol(+) kg <sup>-1</sup> )	2ª ordem	0,0266	0,1173	0,1440	198	126	276,0
K (cmol(+) kg <sup>-1</sup> )	2ª ordem	0,0338	0,1771	0,2110	198	110	345,7
Na (cmol(+) kg <sup>-1</sup> )	2ª ordem	0,0027	0,0029	0,0056	108	108	0,0

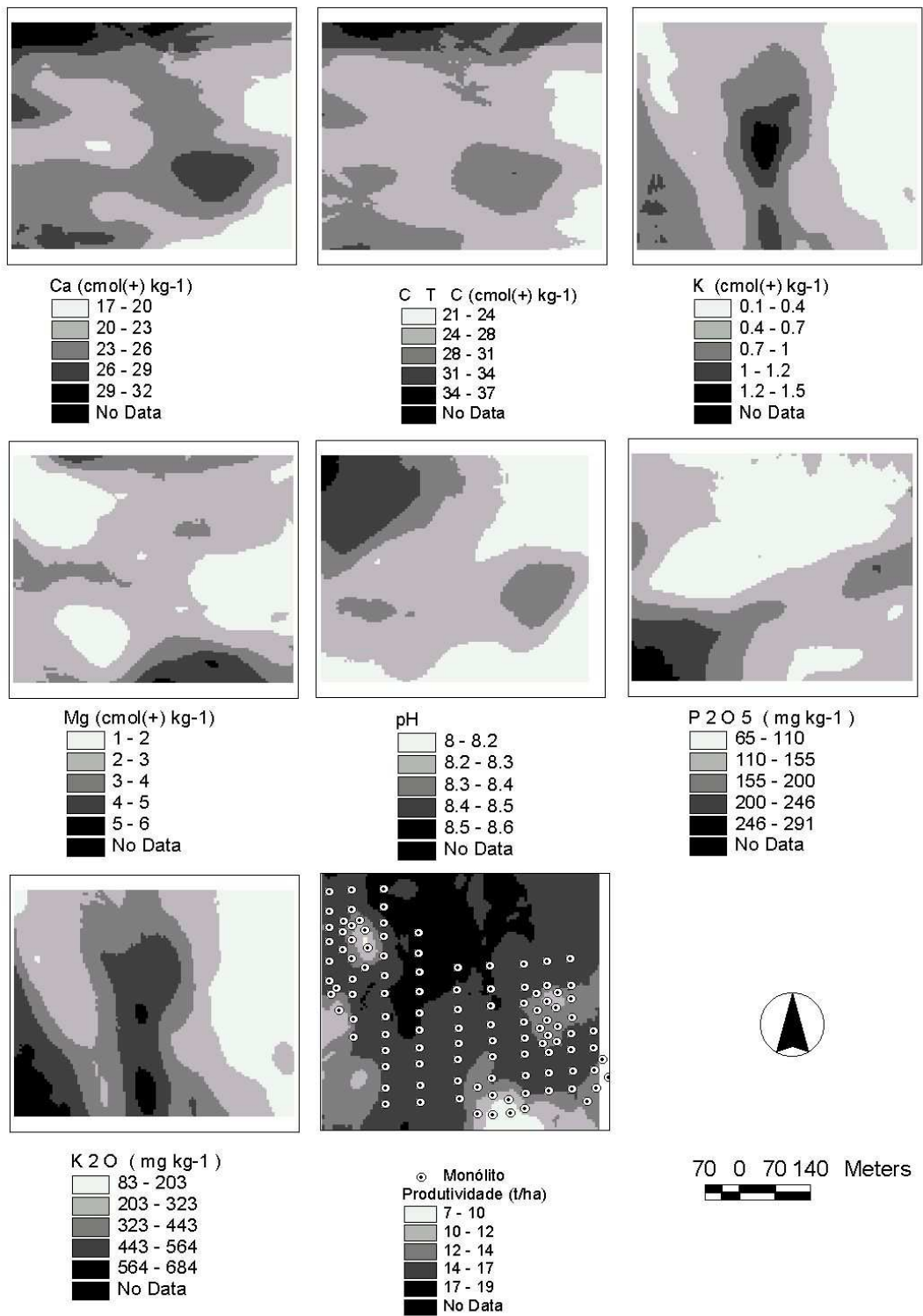
† Ordem de remoção da dependência espacial; \* sem dependência espacial.

## APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

### As propriedades do solo e o sistema de produção

O levantamento dos monólitos de solo teve por base a carta de produtividade (Figura 2), efectuando-se uma amostragem mais densa nas zonas de baixa e alta produtividade usando uma malha relativamente regular e sistemática. Na Figura 2 incluem-se também representações das superfícies obtidas por krigagem a partir dos dados das análises químicas efectuadas ao solo. Pode observar-se uma grande semelhança entre o padrão de distribuição espacial da CTC e do Ca de troca, situação compreensível atendendo a que o Ca é o catião de troca mais abundante. Coerentemente também o padrão de distribuição do pH se aproxima bastante dos dois anteriores, apesar da amplitude de variação se restringir apenas a meia unidade de pH, entre 8,0 e 8,5, em virtude da natureza calcária dominante nestes solos. Comprova-se também uma grande semelhança entre a distribuição do K de troca e do potássio extraível, K<sub>2</sub>O. Parece ainda evidente, embora não permita uma leitura tão imediata, a inversão entre os padrões do Ca e do Mg de troca, o que se justifica atendendo à maior intensidade de adsorção do Ca no complexo de troca, excluindo o caso de solos ricos em vermiculites.

No Quadro 3 apresentam-se os valores do erro padrão para os valores estimados por krigagem onde se constata que os erros padrão, mínimo e máximo, da estimativa de valores da superfície de concentração de fósforo extraível (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) são particularmente elevados, quando comparados, por exemplo, com os do potássio (K<sub>2</sub>O).



**Figura 2** – Superfícies das propriedades do solo e da produtividade do milho obtida por krigagem (Soares, 2000)

O erro padrão permite calcular o intervalo de confiança da estimativa da seguinte forma: "estimativa  $\pm 1,96 \times$  erro padrão". Verifica-se assim, pelo Quadro 3, que todas as superfícies têm um intervalo de confiança relativamente estreito à volta da sua estimativa, com excepção do fósforo que tem um intervalo de confiança bastante amplo, indicando uma maior incerteza em toda a estimativa apresentada na superfície.

Tal informação é preciosa para a apreciação da eficácia das técnicas de amostragem do solo. Com base na análise do erro padrão (Quadro 3), conclui-se que a estratégia de amostragem utilizada não foi a mais adequada para o caso do fósforo extraível mas, em contrapartida, foi válida para as restantes variáveis analisadas. A razão de tal facto prende-se, quanto a nós, com duas razões principais: a técnica de adubação adoptada, com aplicação localizada do fósforo; e a baixa taxa de difusão deste nutriente no solo, o que faz com que o padrão da distribuição espacial do fósforo no solo seja muito dependente do padrão que resulta da técnica de adubação praticada.

**QUADRO 3 – Estatística descritiva das superfícies estimadas por krigagem (Soares, 2000) e do seu respectivo erro padrão**

Variáveis	Mínimo	Máximo	Amplitude	Média	Desvio padrão
	Superfícies				
Produtividade (t/ha)	8,8	18,4	9,7	15,8	1,7
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )	65,3	233,2	167,9	128,2	32,3
K <sub>2</sub> O (mg kg <sup>-1</sup> )	121,4	644,9	523,5	333,6	122,0
PH	8,1	8,6	0,6	8,3	0,1
CTC (cmol(+) kg <sup>-1</sup> )	22,1	36,2	14,1	27,8	2,0
Ca (cmol(+) kg <sup>-1</sup> )	17,2	31,7	14,4	24,1	2,4
Mg (cmol(+) kg <sup>-1</sup> )	1,2	5,9	4,7	2,8	0,8
K (cmol(+) kg <sup>-1</sup> )	0,2	1,5	1,3	0,6	0,3
Erro padrão das superfícies					
Produtividade (Mg há <sup>-1</sup> )	1,11	1,75	0,63	1,23	0,08
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )	40,05	46,69	6,64	43,22	1,19
K <sub>2</sub> O (mg kg <sup>-1</sup> )	0,24	0,54	0,30	0,36	0,06
PH	0,12	0,14	0,02	0,13	0,00
CTC (cmol(+) kg <sup>-1</sup> )	3,86	4,35	0,49	4,06	0,07
Ca (cmol(+) kg <sup>-1</sup> )	3,36	3,96	0,60	3,65	0,11
Mg (cmol(+) kg <sup>-1</sup> )	0,20	0,41	0,21	0,29	0,03
K (cmol(+) kg <sup>-1</sup> )	0,24	0,54	0,30	0,36	0,06

Estes resultados salientam ainda que, para conseguir uma melhor caracterização da distribuição espacial dos nutrientes, é necessário adequar a amostragem ao comportamento de cada nutriente no solo e às práticas de fertilização adoptadas em cada sistema cultural.

### **A topografia e as propriedades do solo**

Os coeficientes de correlação com significância ( $P=0.05$ ) obtidos entre as variáveis relativas à produtividade, propriedades do solo e variáveis topográficas são apresentados no Quadro 4. O declive e a curvatura tiveram quase sempre uma melhor correlação com as propriedades do solo do que a área contributiva específica e o índice de humedecimento de Moore. Foi detectado na área de estudo maior concentração de magnésio e potássio de troca nas zonas de relevo intermédio e nas zonas mais baixas do relevo. Tal observação advém do facto de termos coeficientes de correlação negativa entre o declive e o potássio extraível, entre o declive e o potássio de troca e entre a curvatura e o magnésio de troca.

Observamos também valores de pH e de cálcio de troca mais elevados no topo das zonas convexas do relevo, enquanto que nas zonas do relevo com cota mais baixa e de forma côncava foram detectados os valores mais baixos das variáveis anteriormente mencionadas. Tal é reconhecido pela correlação positiva que estas variáveis têm com a curvatura. Valores elevados de pH e de cálcio nas posições mais elevadas do relevo estão de acordo com o trabalho de Changere & Lal (1997). Este tipo de distribuição espacial deve-se à presença de solos mais delgados no topo das encostas, quando o material originário nestas localizações topográficas é constituído por calcários e calcários associados a xistos, como sucede neste caso (Alexandre *et al.*, 2002). No entanto, a distribuição do fósforo na paisagem não está de acordo com os resultados obtidos por Aguilar & Heil (1988) e Ovalles & Collins (1986). Esta divergência pode estar relacionada com diferentes práticas culturais ou com a baixa qualidade da superfície de isolinhas obtida, pelas razões anteriormente expostas.

Uma análise de regressão linear múltipla mostrou que a topografia explica em média: 35% da variação da concentração de magnésio de troca, 27% da variação do teor de pH, 41% da variação da concentração de potássio extraível e 38% da variação da concentração de potássio de troca. Esta informação vem confirmar que a topografia, de uma forma directa ou indirecta, desempenha um papel importante na gestão da nutrição vegetal.

### A produtividade e as propriedades do solo

Considerando o Quadro 4 podemos constatar que entre todas as propriedades do solo estudadas, a capacidade de troca catiónica e o potássio de troca foram aquelas que revelaram maior influência positiva na produtividade. Observa-se também uma correlação mais fraca entre a produtividade e o potássio extraível e uma correlação negativa entre a produtividade e o fósforo extraível. Uma vez que o solo estudado tem concentrações relativamente elevadas de fósforo e potássio extraíveis, provavelmente o efeito destes nutrientes não será um factor limitante para o crescimento vegetativo e como tal desempenham um papel menor na interpretação da variabilidade espacial. Uma análise de regressão múltipla efectuada com todos os dados mostrou que as variáveis de solo estudadas explicam 33% da variabilidade encontrada na produtividade.

**QUADRO 4 – Coeficientes de correlação (r) entre as propriedades do solo, alguns parâmetros fisiográficos e a produtividade, com um nível de significância de 0,05**

	Prod	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	pH	CTC	Ca	Mg	K	D	ACe	Curv	IM
Prod	-	-0,26	0,20	*	0,24	0,23	*	0,25	-0,26	*	*	*
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		-		0,22	0,21	0,30	-0,34	*	*	*	0,24	*
K <sub>2</sub> O			-	-0,22	0,23	*	0,57	0,96	-0,61	*	*	0,28
pH				-	0,41	0,62	-0,66	-0,23	*	-0,22	0,51	*
CTC					-	0,91	*	0,20	-0,19	*	*	*
Ca						-	-0,39	*	*	*	0,33	*
Mg							-	0,54	-0,31	0,31	-0,49	0,35
K								-	-0,60	*	*	0,23
D									-	*	*	-0,27
ACe										-	-0,30	0,54
Curv											-	-0,38
IM												-

\* valores não significativos

Em todo o caso, pela observação da Figura 2, comprova-se que a variabilidade espacial de certos parâmetros do solo são enormes. Se considerarmos a superfície do potássio de troca, o caso mais flagrante no exemplo em estudo, verificamos que existem em certas zonas do local de estudo, diferenças na concentração deste elemento que vão do simples até 8 a 9 vezes mais. Tal variabilidade terá que ser levada em conta na gestão futura da nutrição vegetal, caso se assumam como objectivos o aumento da eficiência da empresa agrícola e a diminuição dos impactes ambientais provenientes das fertilizações.



## CONCLUSÕES

Conclui-se que o reconhecimento da distribuição espacial de nutrientes no solo requer diferentes técnicas de amostragem, que se devem adequar ao comportamento de cada nutriente no solo e às práticas culturais utilizadas em cada exploração.

Verificamos ainda que as propriedades químicas do solo estudadas sofrem importantes variações no espaço, com efeitos potencialmente significativos sobre a produtividade das culturas e que são apenas parcialmente dependentes das variáveis usadas para descrever a topografia do terreno.

Pelo que foi exposto anteriormente constatamos que a nutrição vegetal não poderá hoje em dia ser encarada de uma forma uniforme na paisagem, mas terá antes que promover a gestão diferenciada dos nutrientes com vista a obter uma maior eficiência empresarial e um menor impacte ambiental.

## AGRADECIMENTOS

Os nossos mais sinceros agradecimentos aos Eng. João Roma, Eng. José Rosado, Eng. Pedro Mogo, Sr. Custódio e Sr. Junça pelo apoio prestado na recolha de toda a informação de campo. Gostaríamos também de referir que parte deste trabalho foi co-financiado pelo projecto AGRO 350.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alexandre, C., Marques da Silva, J. R., Mogo, P. & Rosado, J. 2002. Relações solo-topografia num terreno agrícola: aplicação à espessura efectiva e à tipologia do solo. *Revista de Ciências Agrárias*. SCAP (em publicação).
- Desmet, J. 1997. Effects of interpolation errors on the analysis of DEMs. *Earth Surface Processes and Landforms*, **22**:563-580.
- Environmental Systems Research Institute (ESRI). 1999. *ArcView Spatial Analyst Extension*. ESRI, Redlands, CA, USA.
- Environmental Systems Research Institute (ESRI). 2001. *ArcGIS Geostatistical Analyst*. ESRI, Redlands, CA, USA.

- FAO, ISRIC, ISSS, 1998. *World Reference Base for Soil Resources*. World Soil Resources Report N°84. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome. 88 pp.
- Moore, I. D., Gessler, P. E., Nielsen, G. A. & Peterson, G. A. 1993. Soil attribute prediction using terrain analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **57**:443-452.
- Paz, J. O. 2000. *Analysis of Spatial Yield Variability and Economics of Prescriptions for Precision Agriculture: A Crop Modelling Approach*. PhD dissertation. Iowa State University, Ames, Iowa.
- Paz, J. O., Batchelor, W. D., Babcock, B. A., Colvin, T. S., Logsdon, S. D., Kaspar, T. C. e Karlen, D. L. 1999. Model based technique to determine variable rate nitrogen for corn. *Agric. Syst.*, **61(1)**: 69-75.
- Seidl, M. S., Batchelor, W. D., Fallick, J. B. & Paz, J. O. 2001. GIS-crop model based decision support system to evaluate corn and soybean prescriptions. *Appl. Eng. Agric.*, **23**, 78-83.
- Soares, A. 2000. *Geoestatística para as ciências da terra e do ambiente*. Colecção Ensino da Ciência e da Tecnologia. IST Press. Lisboa.