

REVISTA DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS

VOLUME XXVII

NÚMERO 1

2004

SOCIEDADE PORTUGUESA DA CIÊNCIA DO SOLO

Encontro Anual da Sociedade Portuguesa da Ciência do Solo

“Sistemas de Uso da Terra,
Ordenamento do Território e Ambiente

Ponte de Lima
5 a 7 de Setembro de 2002

EDIÇÃO ESPECIAL

Coordenada por
Manuel A. V. Madeira

SOCIEDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS DE PORTUGAL

Instituição de Utilidade Pública

Fundada em 1903

Lisboa — Portugal

3 — FÍSICA DO SOLO (PROCESSOS FÍSICOS E ÁGUA NO SOLO)

Modelação da Superfície do Solo, *ModeSu*: nivelção pelo plano de mobilização mínima ... 163

António Palma Serafim

Relações solo-topografia num terreno agrícola: aplicação à espessura efectiva e à tipologia do solo 182

Carlos Alexandre, J. R. Marques da Silva, Pedro Mogo & José Rosado

Utilização da técnica TDR na monitorização da água do solo num estudo do crescimento e produção de pimento para congelação 194

M. I. Vieira, M. E. Ferreira, J. C. Martins, M. C. Gonçalves, F. P. Pires, A. Oliveira

Modelação do movimento de água e nitratos no solo: modelo RZWQM 203

M. R. Cameira & R. M. Fernando

Utilização de tensiómetros no controlo da rega e drenagem em rega gota-a-gota em estufas .. 217

R. M. Fernando, J. Agostinho & M. J. Abreu

Efeito das características dos elementos grosseiros na erosão inter-sulcos: um contributo para a sua modelação 230

T. de Figueiredo, A. G. Ferreira, D. Gonçalves & J. Poesen

4 — USO DO SOLO E A QUALIDADE AMBIENTAL. CONSERVAÇÃO E RECUPERAÇÃO DE SOLOS

Adsorção de fluoreto em alguns solos naturais da Galiza (Espanha) 247

A. Romar, C. Gago, M. L. Fernández Marcos & E. Álvarez

Optimização da fertilização da cultura de batata (*Solanum tuberosum*) em A. Limia (Galiza, Espanha) para preservar a qualidade ambiental 255

C. López Mateo, L. Garcia Calvo, E. Álvarez Rodríguez, M. L. Fernández Marcos & T. C. Ferreira

Efeito das águas ruças sobre o pH do solo 266

C. M. Sempiterno & J. C. Soveral Dias

Aplicação de misturas de resíduos alcalinos da indústria da pasta de papel num povoamento de *Eucalyptus globulus* Labill 275

H. M. Ribeiro, A. Sequeira, L. M. Hilário, S. Fabres, L. Machado, E. Vasconcelos & F. Cabral

Avaliação da fertilização azotada na cultura de couve brócolo (*Brassica oleracea* L. var. *italica* Plenck) 283

L. M. Brito & I. M. Mourão

Comportamento do Arsénio (III) e (V) em dois Litossolos e em estevas na área mineira de Neves Corvo 291

M. J. Batista, M. M. Abreu & M. Serrano Pinto

Geoquímica comparada dos solos da área mineira de São Domingos, Alentejo: fundo geoquímico *versus* zona de exploração 301

M. M. Abreu, M. T. Tavares, M. Vairinho, C. Joaquim & L. Quental

Efeito da aplicação do compostado de resíduos sólidos urbanos sobre as características químicas do solo e a relação entre as formas extraíveis e totais dos metais pesados 314

M. S. Gonçalves, A. V. Costa & C. M. Sempiterno

5 — SISTEMAS DE USO DA TERRA E GESTÃO SUSTENTÁVEL DE RECURSOS

Fertilidade de solos afectados por práticas de silvicultura intensiva. I. Efeitos da gestão dos resíduos de abate e da sua composição química nas dinâmicas do C e do N 329

A. Azevedo, M. Madeira, L. Hilário & P. Marques

Influência do freixo (*Fraxinus angustifolia*, Vahl) na qualidade do solo e produção de vegetação herbácea em lameiros do Nordeste Transmontano 347

E. L. Pereira, M. Madeira, M. L. Monteiro & F. Raimundo

RELAÇÕES SOLO-TOPOGRAFIA NUM TERRENO AGRÍCOLA: APLICAÇÃO À ESPESSURA EFECTIVA E À TIPOLOGIA DO SOLO

SOIL-TOPOGRAPHY RELATIONS ON AN AGRICULTURAL FIELD: APPLICATION TO EFFECTIVE SOIL DEPTH AND TO SOIL TYPOLOGY

Carlos Alexandre¹, J. R. Marques da Silva², Pedro Mogo³ & José Rosado³

RESUMO

Em terrenos de relevo ondulado, como sucede em vastas áreas da peneplanície alentejana, são muitas as evidências da relação geral entre as condições topográficas e as características edáficas de que as catenas são a expressão mais paradigmática. O levantamento detalhado dos solos em grandes extensões é uma tarefa muito demorada e de difícil viabilidade financeira. A pesquisa de relações entre a morfologia do terreno e as características edáficas, em áreas seleccionadas, pode permitir a transferência de conhecimentos adquiridos nessas áreas a outras de litologia e topografia equiparáveis, simplificando a amostragem necessária. Neste trabalho apresentam-se os resultados de um levantamento de 211 perfis obtidos com recolha mecânica de monólitos cilíndricos, em duas áreas de 26 e 24 ha na mesma parcela de regadio, próximo de Terena, Redondo. Em ambas as áreas o relevo é bastante ondulado e os solos são derivados de calcários, xistos associados a depósitos calcários, xistos associados a depósitos coluviais. A Análise em Componentes Principais não evidenciou qualquer correlação entre as variáveis quantitativas da morfologia do ter-

reno e a espessura efectiva do solo. A Análise Factorial de Correspondências aplicada a um maior conjunto de dados, quantitativos e qualitativos, permitiu uma boa definição da relação entre as características do solo e a morfologia do terreno para as situações extremas: as unidades topográficas de alto de encosta estão fundamentalmente associadas à classe de espessura mais reduzida (menor que 50 cm) e aos Solos Calcários, em grande parte devido à ocorrência da litologia calcária nas zonas de maior cota; nas unidades de base de encosta convergentes e vales, ocorrem os solos de maior espessura (entre 80 e 120 cm), principalmente Colúviosolos, mas também Solos Hidromórficos, juntamente com a classe mais alta do índice de humedecimento (W). Nas áreas de meia encosta verifica-se uma maior indefinição, ocorrem as classes baixa e intermédia do índice de humedecimento e os solos vão dos mais delgados aos mais espessos, correspondendo a solos Calcários e Argiluvitados.

ABSTRACT

On the peneplane of Alentejo region it is not difficult to find out the most paradigmatic

¹ Dep. de Geociências, Universidade de Évora, Apartado 94, 7002-554 Évora; email: cal@uevora.pt

² Dep. de Eng. Rural, Universidade de Évora, Apartado 94, 7002-554 Évora

³ Finalistas do curso de Eng. Agrícola, Universidade de Évora

matic expressions of the relationship between land geomorphology and soil properties – the catenas. The study of these relationships in small areas can be very useful for soil surveys of bigger areas under similar topography and lithology. This study presents the results of 211 soil profiles monoliths collected with a mechanical probe on two areas, of 26 and 24 ha, on the same irrigation field, near Terena, (south Redondo). Both areas have a rolling topography and soils developed on limestone, schist associated with deposits of limestone, schist and colluvial deposits. With the Principal Components Analysis was not possible to find a correlation between quantitative variables of land morphology and the effective soil depth. With the Correspondence Analysis applied to a larger set of data, including quantitative and qualitative variables, also related with lithology and soil characteristics, it is possible to establish good relationships between soil and land morphology for the most extreme situations: topographic units on upper slopes are mainly associated to the lower class of effective depth (less than 50 cm) and to Calcaric Regosols and Calcaric Cambisols (S. Calcários) – this is explained by the fact that limestone parent material occurs in the higher parts of both areas; topographic units on lower slopes and bottoms have the deepest soils (between 80 and 120 cm) which are Fluvisols (of colluvial origin - Coluviosolos) and Gleysols or stagnic units of others soil reference groups (S. Hidromórficos), these zones also have the highest class of the wetness index. In the middle slope units the relationships are not so clear, they can have the lowest or intermediate classes of the wetness index, the soils can be from the shallowest to the deepest, being Calcaric Regosols and Calcaric Cambisols (S. Calcários) or Luvisols (S. Argiluviados).

INTRODUÇÃO

É conhecida a importância do relevo como factor pedogenético, podendo-se considerar as catenas, ou topossequências, talvez como a expressão mais paradigmática da influência de um factor de formação do solo. Em terrenos de relevo ondulado, como sucede em largas extensões da peneplanície alentejana, são facilmente observáveis evidências desta relação geral entre a morfologia do terreno e as características edáficas.

Numa altura em que se começam a garantir os recursos hídricos indispensáveis para um melhor aproveitamento de alguns dos solos mais produtivos daquela região e, por outro lado, quando estão disponíveis técnicas agrícolas cada vez mais sofisticadas, no âmbito do que se tem designado por “agricultura de precisão”, torna-se indispensável o conhecimento dos solos dessas áreas a um nível mais detalhado do que o fornecido pela Carta de Solos de Portugal à escala 1:50.000. O levantamento detalhado dos solos em grandes extensões é uma tarefa muito demorada e exigente sob o ponto de vista financeiro. O estudo de relações entre a morfologia do terreno e as características edáficas, com base em levantamentos detalhados em áreas seleccionadas, pode permitir a transferência dos conhecimentos adquiridos nessas áreas a outras de litologia e topografia equiparáveis na mesma região. A generalização dos Modelos Digitais de Terreno (MDT) e dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) veio facilitar a quantificação de atributos da morfologia do terreno. Em particular os atributos relevantes para os processos hidrológicos apresentam também um potencial interesse para os processos pedogenéticos (Park & Burt, 2002), para o reconhecimento de solos (McLeod *et al.*, 1995; Slater *et al.*, 1994) e para previsão de propriedades edáficas importantes para o

(versão postprint)

Relações solo-topografia num terreno agrícola: aplicação à espessura efectiva e à tipologia do solo

Soil-topography relations on an agricultural field: application to effective soil depth and to soil typology

Carlos Alexandre¹, J. R. Marques da Silva², Pedro Mogo³ & José Rosado³

¹ *Dep. de Geociências, Universidade de Évora, Apartado 94, 7002-554 Évora;
email: cal@uevora.pt*

² *Dep. de Eng. Rural, Universidade de Évora, Apartado 94, 7002-554 Évora*

³ *Finalistas do curso de Eng. Agrícola, Universidade de Évora*

RESUMO

Em terrenos de relevo ondulado, como sucede em vastas áreas da peneplanície alentejana, são muitas as evidências da relação geral entre as condições topográficas e as características edáficas de que as catenas são a expressão mais paradigmática. O levantamento detalhado dos solos em grandes extensões é uma tarefa muito demorada e de difícil viabilidade financeira. A pesquisa de relações entre a morfologia do terreno e as características edáficas, em áreas seleccionadas, pode permitir a transferência de conhecimentos adquiridos nessas áreas a outras de litologia e topografia equiparáveis, simplificando a amostragem necessária. Neste trabalho apresentam-se os resultados de um levantamento de 211 perfis obtidos com recolha mecânica de monólitos cilíndricos, em duas áreas de 26 e 24 ha na mesma parcela de regadio, próximo de Terena, Redondo. Em ambas as áreas o relevo é bastante ondulado e os solos são derivados de calcários, xistos associados a depósitos calcários, xistos e depósitos coluviais. A Análise em Componentes Principais não evidenciou qualquer correlação entre as variáveis quantitativas da morfologia do terreno e a espessura efectiva do solo. A Análise Factorial de Correspondências aplicada a um maior conjunto de dados, quantitativos e qualitativos, permitiu uma boa definição da relação entre as características do solo e a morfologia do terreno para as situações extremas: as unidades topográficas de alto de encosta estão fundamentalmente associadas à classe de espessura mais reduzida (menor que 50 cm) e aos Solos Calcários, em grande parte devido à ocorrência da litologia

calcária nas zonas de maior cota; nas unidades de base de encosta convergentes e vales, ocorrem os solos de maior espessura (entre 80 e 120 cm), principalmente Coluviosolos, mas também Solos Hidromórficos, juntamente com a classe mais alta do índice de humedecimento (W). Nas áreas de meia encosta verifica-se uma maior indefinição, ocorrem as classes baixa e intermédia do índice de humedecimento e os solos vão dos mais delgados aos mais espessos, correspondendo a solos Calcários e Argiluvitados.

ABSTRACT

On the peneplane of Alentejo region it is not difficult to find out the most paradigmatic expressions of the relationship between land geomorphology and soil properties – the catenas. The study of these relationships in small areas can be very useful for soil surveys of bigger areas under similar topography and lithology. This study presents the results of 211 soil profiles monoliths collected with a mechanical probe on two areas, of 26 and 24 ha, on the same irrigation field, near Terena, (south Redondo). Both areas have a rolling topography and soils developed on limestone, schist associated with deposits of limestone, schist and colluvial deposits. With the Principal Components Analysis was not possible to find a correlation between quantitative variables of land morphology and the effective soil depth. With the Correspondence Analysis applied to a larger set of data, including quantitative and qualitative variables, also related with lithology and soil characteristics, it is possible to establish good relationships between soil and land morphology for the most extreme situations: topographic units on upper slopes are mainly associated to the lower class of effective depth (less than 50 cm) and to Calcaric Regosols and Calcaric Cambisols (S. Calcários) – this is explained by the fact that limestone parent material occurs in the higher parts of both areas; topographic units on lower slopes and bottoms have the deepest soils (between 80 and 120 cm) which are Fluvisols (of colluvial origin - Coluviosolos) and Gleysols or stagnic units of others soil reference groups (S. Hidromórficos), these zones also have the highest class of the wetness index. In the middle slope units the relationships are not so clear, they can have the lowest or intermediate classes of the wetness index, the soils can be from the shallowest to the deepest, being Calcaric Regosols and Calcaric Cambisols (S. Calcários) or Luvisols (S. Argiluvitados).

INTRODUÇÃO

É conhecida a importância do relevo como factor pedogenético, podendo-se considerar as catenas, ou topossequências, talvez como a expressão mais paradigmática da influência de um factor de formação do solo. Em terrenos de relevo ondulado, como sucede em largas extensões da peneplanície alentejana, são facilmente observáveis evidências desta relação geral entre a morfologia do terreno e as características edáficas.

Numa altura em que se começam a garantir os recursos hídricos indispensáveis para um melhor aproveitamento de alguns dos solos mais produtivos daquela região e, por outro lado, quando estão disponíveis técnicas agrícolas cada vez mais sofisticadas, no âmbito do que se tem designado por “agricultura de precisão”, torna-se indispensável o conhecimento dos solos dessas áreas a um nível mais detalhado do que o fornecido pela Carta de Solos de Portugal à escala 1:50.000. O levantamento detalhado dos solos em grandes extensões é uma tarefa muito demorada e exigente sob o ponto de vista financeiro. O estudo de relações entre a morfologia do terreno e as características edáficas, com base em levantamentos detalhados em áreas seleccionadas, pode permitir a transferência dos conhecimentos adquiridos nessas áreas a outras de litologia e topografia equiparáveis na mesma região. A generalização dos Modelos Digitais de Terreno (MDT) e dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) veio facilitar a quantificação de atributos da morfologia do terreno. Em particular os atributos relevantes para os processos hidrológicos apresentam também um potencial interesse para os processos pedogenéticos (Park & Burt, 2002), para o reconhecimento de solos (McLeod *et al.*, 1995; Slater *et al.*, 1994) e para previsão de propriedades edáficas importantes para o uso do solo (Thompson *et al.*, 1997; Bell *et al.*, 1994).

Com este trabalho pretende-se fazer uma análise interpretativa dos dados obtidos com a amostragem de 211 perfis de solo em duas áreas, com 26 e 24 ha, numa mesma parcela de regadio, em que se procuram salientar eventuais relações entre as características morfológicas do solo e a morfologia do terreno para o conjunto da área estudada. Das variáveis morfológicas do solo privilegiou-se uma de tipo quantitativo, a espessura efectiva, e outra de tipo qualitativo, a tipologia do solo expressa pelas Ordens ou Subordens da Classificação dos Solos de Portugal (Cardoso, 1974) a que pertence cada perfil estudado.

MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo incidiu em dois blocos, A e B, respectivamente com uma área de 26 e 24 ha, situados ambos na mesma parcela de regadio da Herdade do Pigeiro, próximo de Terena, a sudeste de Redondo. Conforme se pormenoriza em Marques da Silva *et al.* (2002), neste mesmo volume, o estudo envolveu a realização de sondagens geo-referenciadas, 109 no Bloco A e 102 no Bloco B. Em cada ponto de amostragem, recorrendo a uma sonda cilíndrica com um percussor mecânico, extraíram-se monólitos de solo com 9,5 cm de diâmetro e 120 cm de profundidade, no máximo. Ambos os blocos, A e B, apresentam uma morfologia de terreno muito ondulada com declives que variam desde cerca de 1% a 28% (Figura 1). Também a litologia é bastante diversificada atendendo à extensão das áreas em estudo, encontrando-se calcários nas zonas de maior cota (alto das encostas), xistos associados a depósitos calcários essencialmente em áreas envolventes às anteriores (meia-encosta), xistos também na meia-encosta e na base de algumas encostas. Nas zonas convergentes das encostas (próximo das linhas de água) principalmente para baixo da meia encosta até ao vale, encontram-se ainda depósitos coluviais de texturas mais ou menos finas, em alguns casos com carbonatos e em outros, com elevada proporção de elementos grosseiros.

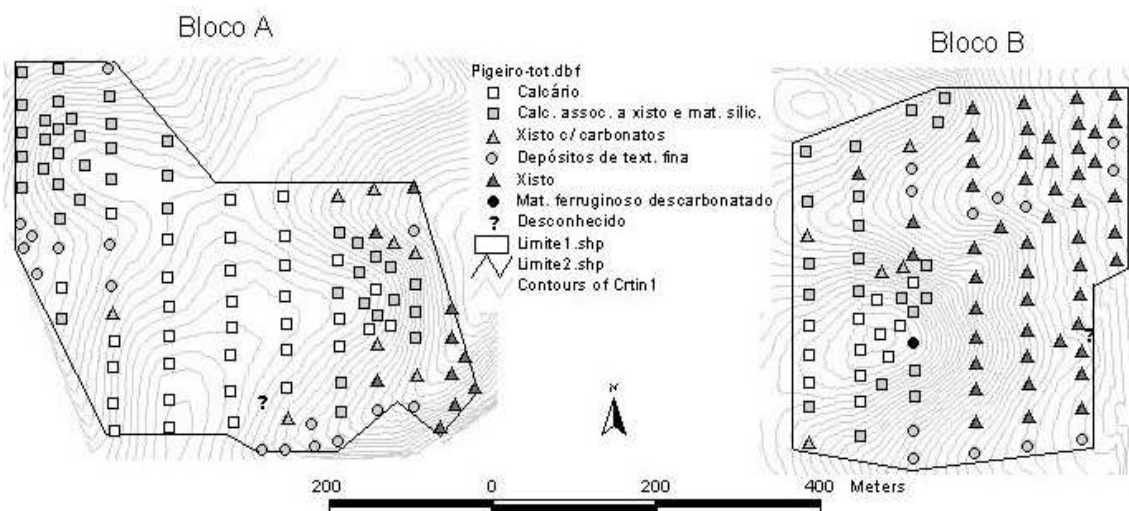


Figura 1 – Área de estudo dividida em dois blocos, A e B, respectivamente com 26 e 24 ha. O canto inferior esquerdo do bloco B situa-se a cerca de 250 m a Norte do canto superior direito do bloco A.

As variáveis consideradas neste estudo são apresentadas no Quadro 1 onde estão separadas em variáveis quantitativas e qualitativas. As variáveis quantitativas usadas para a morfologia do terreno, o declive (D), a área contributiva específica (AC), o índice de humedecimento ('wetness index', W) e o índice de potência do escoamento ('stream power index', SP), foram obtidos a partir do modelo digital de terreno (MDT) elaborado de acordo com a metodologia descrita em Marques da Silva *et al.* (2002). Os índices W e SP são ambos adimensionais e obtêm-se aplicando as seguintes expressões (Moore *et al.*, 1993):

$$W = \ln (AC/D \ 100)$$

$$SP = AC \ D/100$$

em que AC é a área a montante que contribui com escoamento superficial para o ponto considerado, por unidade de largura (m), e D o declive (%). Conforme se refere em Marques da Silva *et al.* (2002), em cada um dos 211 pontos de amostragem efectuou-se também uma análise de vizinhança circular das variáveis D, AC e W, tomando os raios de 5, 10, 25 e 50 metros em redor da coordenada do local, o que permitiu elaborar uma base de dados com a média, os valores mínimos e máximos observados em cada uma dessas vizinhanças dos pontos de amostragem. Neste artigo, atendendo à reduzida área de terreno representada pelas amostras de solo, considerámos os valores correspondentes a cada ponto (com base no MDT elaborado correspondem a células com a área de 1 m²) e ainda os valores relativos às vizinhanças de 5 e 10 m de raio (valores médios representados como: D₅, AC₅, W₅, D₁₀, AC₁₀ e W₁₀ e valores máximos como: D_{mx5}, AC_{mx5}, W_{mx5}, D_{mx10}, AC_{mx10} e W_{mx10}). A variável SP só foi considerada para cada ponto (células de 1 m²). São consideradas também algumas variáveis qualitativas da morfologia do terreno obtidas com base em observações locais e do MDT (Quadro 1).

As variáveis relativas à litologia e ao solo estão igualmente indicadas no Quadro 1 e, no caso do solo, englobam apenas variáveis morfológicas obtidas por observação e descrição sumária dos monólitos cilíndricos com base na metodologia da FAO (1990). A profundidade máxima observada (Pmx) foi interpretada como espessura até à existência de uma camada com forte compactidade, impeditiva da normal progressão da sonda mecânica, o que se poderá admitir como aproximadamente equivalente à

espessura efectiva do solo (FAO, 1990), mas apenas nas áreas sem outro tipo de limitações ao desenvolvimento das raízes, por exemplo, material originário calcário.

QUADRO 1 – Variáveis e classes usadas na descrição da morfologia do terreno e dos perfis do solo submetidas à Análise Factorial de Correspondência (AFC).

Var.	Cls.	Descrição
Variáveis qualitativas		
Ut		Unidade topográfica ou de terreno onde se insere o perfil de solo observado (principalmente a posição na encosta e a forma da encosta)
	1	Alto da encosta (na área em estudo praticamente não existem áreas de plataforma ou "plateau" acima da encosta)
	2	Meia encosta, com secção transversal Divergente ou Linear
	3	Meia encosta, com secção transversal Convergente e Base da encosta com secção transversal Divergente ou Linear
	4	Base da encosta com secção transversal Convergente e fundo de Vale
Df		Distância do perfil à linha de fecho em proporção da distância máxima verificada em cada bloco de estudo (~400m)
	1	A menos de 25% da distância máxima em cada bloco
	2	Entre 25 e 50% da distância máxima em cada bloco
	3	A mais de 50% da distância máxima em cada bloco
Dt		Distância do perfil ao talvegue ou linha de água mais próxima
	1	Muito próximo da linha de água
	2	Medianamente afastado da linha de água mas ainda na mesma unidade topográfica (Ut) onde se inclui a linha de água (necessária/ Convergente)
	3	Muito afastado da linha de água (em outra unidade topográfica que não inclui qualquer linha de água)
Lit		Litologia ou material originário do solo
	1	Calcários
	2	Fundamentalmente xisto associado a depósitos calcários
	3	Xisto
	4	Depósitos de materiais de textura fina (sem ou com carbonatos)
So		Identificação provisória das Ordens ou Subordens da Classificação dos Solos de Portugal (Cardoso, 1974) e correspondência para a WRB (FAO <i>et al.</i> , 1998)
	1	Coluviosolos (Fluvisolos, exclusivamente de origem coluvial)
	2	S. Calcários (essencial/ Regossolos e Cambissolos Calcários)
	3	S. Argiluiados Pouco Insaturados (principalmente Luvisolos)
	4	S. Hidromórficos (Gleissolos e unidades estagnáticas grupos diversos)
Crb		Carbonatos no horizonte Ap
	0	Sem carbonatos
	1	Desde ligeiramente a fortemente calcário (FAO,1990)
	2	Extremamente calcário em toda a espessura do horizonte Ap (FAO,1990)
Hi		Indícios de hidromorfismo na espessura de solo observada
	0	Sem indícios evidentes de hidromorfismo
	1	Indícios de má drenagem apenas na camada arável (< 25 cm de profund.)
	2	Indícios de má drenagem subsuperficial incluindo ou não a camada arável.
Variáveis quantitativas (transformadas em classes)		
D	3	Declive (classes de igual frequência)
W	3	Índice de humedecimento ('wetness index', Moore <i>et al.</i> , 1993). Ver no texto significado de Wmx usado com os limites de classes: 16-11-9,5-0
AC	3	Área contributiva específica com escoamento superficial
SP	3	Índice de potência do escoamento ('stream power index', Moore <i>et al.</i> , 1993)
Pmx	3	Profundidade máxima observada, equivalente à espessura efectiva apenas nas áreas de material originário não calcário; classes com limites: 120-80-50-0 cm

Atendendo à diversidade de variáveis disponíveis, quantitativas e qualitativas, estas últimas quer de tipo ordinal quer nominal, consideraram-se duas abordagens interpretativas: a Análise em Componentes Principais (ACP) para as variáveis quantitativas e a Análise Factorial de Correspondências (AFC), para os dois tipos de variáveis, em ambos os casos recorrendo ao programa Andad 7.10 (CVRM, 2002).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Apresenta-se e discute-se o quadro de dados obtido salientando as relações observadas entre alguns parâmetros da morfologia do terreno com a espessura efectiva do solo e com o tipo de solo, este traduzido pelas ordens ou subordens da Classificação dos Solos de Portugal.

Tomando apenas as variáveis quantitativas, pode observar-se no Quadro 2 que as correlações entre a profundidade máxima observada (Pmx) e as variáveis descritoras da morfologia do terreno são muito baixas em todos os casos.

QUADRO 2 – Coeficientes de correlação (Pearson) entre Pmx (profundidade máx. obs.) e as variáveis quantitativas da morfologia do terreno (v. Materiais e Métodos).

D	AC	W	SP	D ₅	AC ₅	W ₅	D ₁₀	AC ₁₀	W ₁₀	D _{mx5}	AC _{mx5}	W _{mx5}	D _{mx10}	AC _{mx10}	W _{mx10}
-0.14	0.16	0.37	0.14	-0.15	0.27	0.46	-0.16	0.28	0.47	-0.14	0.21	0.43	-0.12	0.24	0.47

Constata-se, no entanto, uma ligeira melhoria nas correlações quando se consideram os valores médios para as vizinhanças de 5 e 10 m de raio. Essa melhoria é mais notória para o índice de humedecimento (W) que atinge a correlação mais elevada usando o valor máximo observado na vizinhança de 10 m de raio ($r = 0,473$), embora com um valor só ligeiramente superior à correlação obtida com a média de W na mesma vizinhança ($r = 0,466$). O índice de humedecimento integra as variáveis D e AC e, tal como estas, depende das características do MDT. Em particular a contabilização da área a montante que contribui com escoamento superficial (AC) pode dar origem a grandes discrepâncias em pontos muito próximos. Cada célula do MDT utilizado apresenta 1 m², assim, podemos ter duas células contíguas em que uma delas apresenta um valor de AC de algumas centenas de metros enquanto a outra pode ter um valor nulo (logo $W = 0$). A análise da vizinhança em cada ponto de amostragem do solo tenta minimizar este

problema. O uso dos valores máximos obtidos em cada vizinhança, partiu do princípio de que assim se salientam as características morfológicas do terreno na área envolvente ao ponto de observação do solo. No entanto, esta abordagem só deu uma ligeira melhoria de correlação com a espessura do solo no caso do índice de humedecimento.

No Quadro 3 e na Figura 2 apresentam-se os resultados da ACP (apenas para os eixos 1 e 2) efectuada com as variáveis quantitativas da morfologia do terreno, estando também a variável Profundidade Máxima Observada (Pmx) apresentada no gráfico com projecção em suplementar. Como seria de esperar verifica-se uma forte correlação entre as diversas variantes do declive (D) e também da área contributiva (AC), neste último caso com uma excepção correspondente à área contributiva em cada ponto ou célula de 1 m². No caso do índice de humedecimento (W) já não se verifica uma correlação tão estreita entre as suas diferentes variantes. Mas, mais do que uma interpretação geral dos dados e da agregação de variáveis em factores explicativos, interessa-nos nesta análise, salientar a má representação da variável Pmx no plano do sistema de eixos 1 e 2 (Pmx está muito afastada da circunferência unitária – Figura 2). Essa má representação verifica-se igualmente em todos os outros planos formados com os restantes eixos que apresentam menor percentagem de explicação. Assim, o quadro de dados analisado não permite estabelecer uma relação evidente entre as variáveis quantitativas da morfologia do terreno, quer sejam tomadas isoladamente quer sejam agregadas em factores explicativos obtidos pela ACP, e a espessura efectiva do solo, representada de forma aproximada pela variável Pmx.

QUADRO 3 – Valores próprios e percentagem de explicação para os 5 primeiros eixos da ACP com as variáveis quantitativas da morfologia do terreno.

Eixos	Valor próprio	% Exp	% Acum
1	7.177	44.853	44.853
2	3.418	21.364	66.217
3	2.390	14.937	81.154
4	1.248	7.800	88.954
5	0.587	3.665	92.620

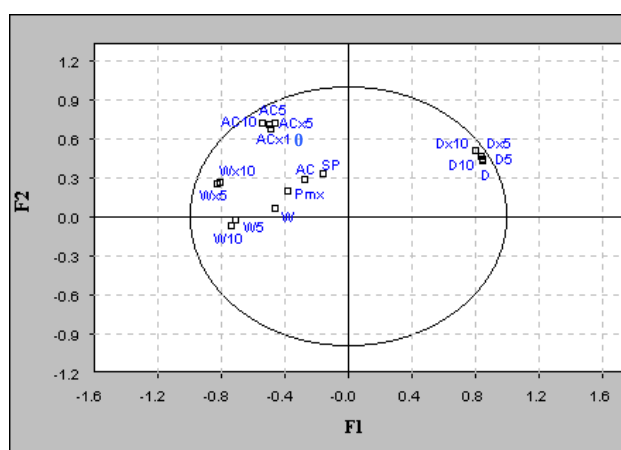


Figura 2 – ACP com as variáveis quantitativas da morfologia do terreno apresentando a variável Pmx (profundidade máxima observada) projectada como complementar. Variáveis dos valores máximos nas vizinhanças têm um x antes do raio respectivo.

Esta má correlação da espessura efectiva com as variáveis quantitativas utilizadas para a morfologia do terreno evidencia a necessidade de testar estas relações com uma maior diversidade de variáveis da morfologia do terreno. Além disso, o exemplo de Park & Burt (2002), que encontraram a correlação mais elevada entre os atributos do solo e do terreno para um MDT com uma grelha de 10 m, revela também a necessidade de se analisar a influência de diferentes metodologias alternativas para a quantificação de cada uma dessas variáveis.

Aproveitando a versatilidade da AFC para analisar variáveis quantitativas e qualitativas procurou-se obter uma interpretação mais abrangente dos dados disponíveis, entrando também com outras variáveis que reflectem a diversidade litológica da área em estudo e da morfologia geral dos perfis observados. No entanto, dada a grande redundância das variáveis consideradas para a morfologia do terreno (qualitativas e quantitativas) efectuaram-se alguns testes de AFC de modo a seleccionar a conjugação mínima desse tipo de variáveis que, em conjunto com as variáveis relativas à litologia e à morfologia do solo, permitem obter um quadro interpretativo mais completo. No Quadro 4 comparam-se as percentagens acumuladas para a explicação dos 3 primeiros eixos obtidos da AFC efectuada para os diferentes conjuntos de variáveis da morfologia do terreno indicados.

QUADRO 4 – Comparação da percentagem de explicação acumulada obtida para os 3 primeiros eixos das AFC realizadas às variáveis qualitativas e quantitativas da morfologia do terreno.

			Variáveis				% Explicação acumulada		
Ut	Df	Dt	D	AC	W	SP	Eixo1	Eixo 2	Eixo 3
x	x	x					53.5	68.2	80.9
			1	1	1		45.7	73.9	87.8
			1	1	1	1	46.3	70.4	81.2
			5	5	5		47.2	72.0	87.7
			10	10	10		48.6	70.8	85.9
			mx10	mx10	mx10		49.9	71.6	81.7

Verifica-se que a percentagem de explicação obtida com as variáveis quantitativas é ligeiramente melhor do que a conseguida com as variáveis qualitativas quando se consideram os primeiros 2 ou 3 eixos, mas ligeiramente pior quando se considera apenas o eixo 1. A variável SP, em conjunto com as restantes variáveis para os valores pontuais, não introduz nenhuma melhoria significativa na interpretação dos dados.

A selecção de variáveis para a AFC apresentada na Figura 3 (A e B) inclui as variáveis Ut, Dt, W_{mx10} , da morfologia do terreno, juntamente com as variáveis Lit, Pmx, So, Crb e Hid, relativas à litologia e ao solo. As variáveis quantitativas Pmx e W_{mx10} (indicada como Wmx nos gráficos) foram divididas em 3 classes com os seguintes limites: 120-80-50-0 cm e 16-11-9,5-0, respectivamente. Relativamente às variáveis quantitativas da morfologia do terreno, é de salientar que se em vez da variável seleccionada (W_{mx10}) se usarem as variáveis W ou AC (excluindo os valores pontuais – das células de 1 m²) se obtêm resultados quase equiparáveis. A utilização do declive dá sempre um resultado interpretativo bastante mais fraco, em todos os casos, e combinações com mais de uma destas variáveis quantitativas dão também pior resultado.

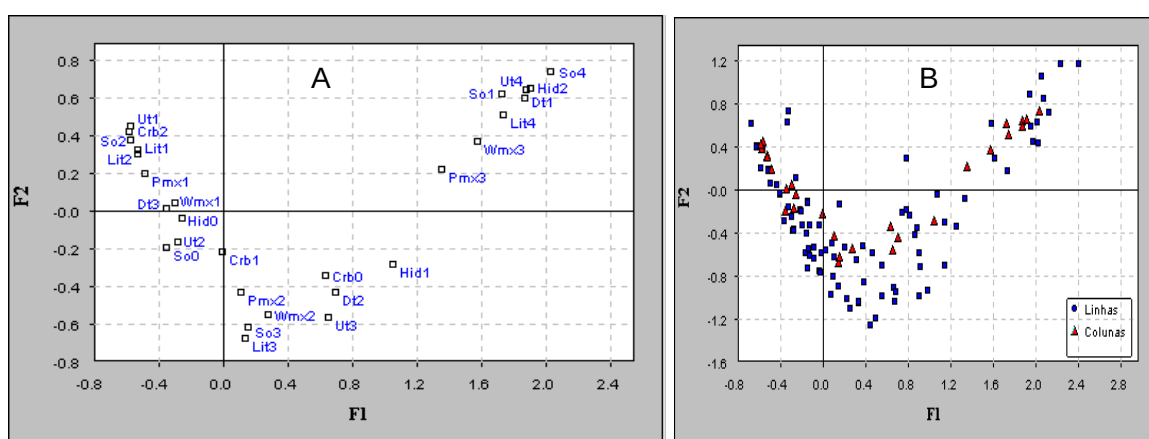


Figura 3 –AFC com todas as variáveis seleccionadas (ver texto). A – projecção das variáveis no sistema de eixos 1 (60,0% de explicação) e 2 (17,3% de explicação). B – projecção no mesmo sistema de eixos das variáveis (colunas) e das amostras (linhas). A variável Wmx é a W_{mx10} .

Com os dois primeiros eixos consegue-se uma explicação acumulada superior a 75% (60,0% no eixo 1, aumentando para 77,3% com o eixo 2). Com o eixo 3 a explicação conseguida aumenta para 81,5%, o que já representa um acréscimo pouco significativo. Analisando os gráficos da Figura 3 e as contribuições absolutas (Quadro 5) pode-se interpretar o eixo 1 como fazendo a oposição entre um conjunto de características associadas em que se inclui a litologia de depósitos coluviais (Lit4), unidades topográficas de bases de encosta convergentes e vales (Ut4), muito próximo de linhas de água (Dt1), com solos de maior espessura (Pmx3), que apresentam indícios de hidromorfismo (So4 e Hid2) com índice de humedecimento mais alto (W_{mx10}), características estas que se acentuam para a direita do eixo 1 enquanto se acentua o seu contrário para a esquerda. O eixo 2 estabelece a oposição entre solos derivados de xisto

(Lit3), principalmente Solos Argiluvitados (So3) e essencialmente com espessuras intermédias (Pmx2), características que se acentuam para a parte inferior do eixo 2 enquanto na parte superior temos amostras relativas a solos Calcários (So2) e em geral fortemente calcários em todo o perfil e (Crb2).

Na Figura 4 apresenta-se uma AFC aos mesmos dados e variáveis referidos anteriormente mas em que a variável Pmx, dividida em 3 classes, é a única analisada como variável principal sendo todas as restantes projectadas como variáveis suplementares. Nestas condições os eixos factoriais reduzem-se a 2 dando 71,8% de explicação dos dados com o eixo 1 e 100% de explicação com os 2 eixos.

QUADRO 5 – Contribuições absolutas > 5,0 (sublinhadas) para os eixos 1 e 2 da AFC apresentada na Figura 3.

Variáveis	Eixo 1	Eixo 2
Pmx2	0.093	<u>5.666</u>
Pmx3	<u>8.110</u>	0.758
Wmx3	<u>8.056</u>	1.561
Ut4	<u>9.142</u>	3.752
Dt1	<u>8.635</u>	3.051
Lit3	0.176	<u>14.806</u>
Lit4	<u>10.997</u>	3.310
So2	4.265	<u>6.491</u>
So3	0.271	<u>14.810</u>
So4	<u>8.044</u>	3.721
Crb2	3.897	<u>7.018</u>
Hid2	<u>8.026</u>	3.263

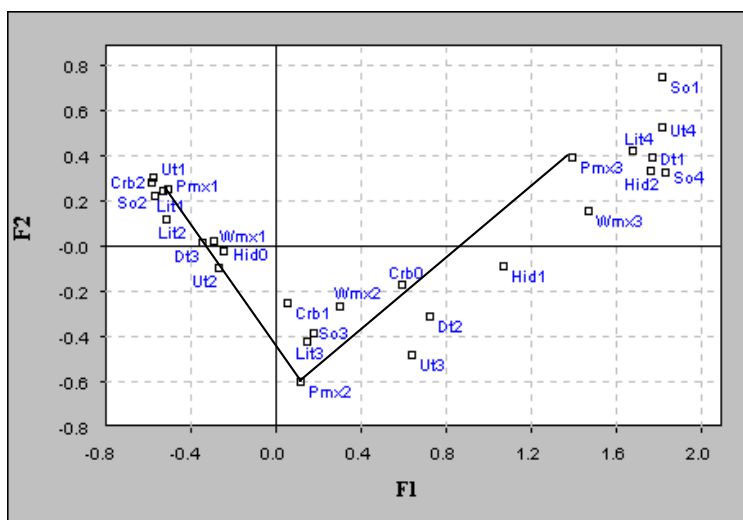


Figura 4 – AFC com a variável Pmx (profundidade máxima observada dividida em 3 classes, limites: 120-80-50-0 cm) como principal e as restantes variáveis em complementar.

O eixo 1 estabelece a separação entre as classes de maior espessura de solo (para a direita) e as de menor (para a esquerda), enquanto o eixo 2 diferencia a classe intermédia (para baixo). Ao projectar as restantes variáveis neste sistema de eixos pode verificar-se quais as classes dessas variáveis que mais se relacionam com cada uma das 3 classes de espessura de solo definidas. No Quadro 6 sintetizam-se as características mais relevantes para cada uma dessas classes da variável Pmx, aproximada à espessura efectiva do solo.

Na relação de Pmx com a morfologia do terreno verifica-se que são as situações extremas que se apresentam mais bem definidas. As unidades topográficas de alto de

encosta divergentes e lineares (Ut1) e de bases de encosta convergentes e vales (Ut4) estão fundamentalmente associadas à classe de espessura menor que 50 cm (Pmx1) e à classe entre 80 e 120 cm (Pmx3), respectivamente. As unidades topográficas de alto de encosta convergente e de meia encosta divergente e linear (Ut2) repartem-se pelas classes de solos mais delgados (Pmx1) e intermédios (Pmx2) com algum predomínio dos primeiros. As unidades topográficas de meia encosta convergente e de base de encosta divergente e linear (Ut3) repartem-se pelas classes de solos intermédios (Pmx2) e mais espessos (Pmx3) também com predomínio dos primeiros. Relativamente ao índice de humedecimento (Wmx) é particularmente notória a correspondência entre as classes Wmx3 e Pmx3. Para as duas classes restantes de Wmx já não se verifica grande correspondência com as classes de Pmx, no entanto ainda é evidente uma maior aproximação de Wmx2 a Pmx2 e de Wmx1 a Pmx1.

QUADRO 6 – Características dominantes de cada classe da variável profundidade máxima observada (Pmx) obtida pela Análise Factorial de Correspondências.

Classes	cm	Caracterização
Pmx1	0-50	Grupo de solos pertencentes à ordem dos Solos Calcários (So2), derivados de calcários (Lit1) e xistos associados a calcários (Lit2), extremamente calcários em todo o perfil (Crb2), existentes principalmente em unidades no alto de encosta (Ut1), com baixo índice de humedecimento, inferior a 9,5 (Wmx1).
Pmx2	50-80	Grupo de solos essencialmente Argiluvitados (So3), derivados de xistos (Lit3), alguns com carbonatos (Crb1), principalmente com um índice de humedecimento entre 9,5 e 11,0 (Wmx2) que corresponde a zonas de meia encosta (Ut2) e de base de encosta não convergentes (Ut3).
Pmx3	80-120	Grupo de solos derivados de depósitos de origem coluvial (Lit4), essencialmente Hidromórficos (So4), mas também Coluviais (So1), com um elevado índice de humedecimento, superior a 11,0 (Wmx3), correspondendo a zonas de base de encosta convergentes e vales (Ut4) e situados muito perto das linhas de água (Dt1).

Na Figura 5 voltamos a ter as mesmas variáveis mas agora considerando como variável principal o tipo de solo expresso pelas ordens ou subordens (So1 a So4) e as restantes variáveis projectadas em suplementar. Neste caso, com 4 classes, todo o quadro de dados fica explicado a 100% com 3 eixos (56,7% com o eixo 1 e 85,8% acrescentando o eixo 2). A ligação das classes da variável So não segue a ordem numérica o que é irrelevante, neste caso, dado tratar-se de uma variável nominal.

O eixo 1 separa os Solos Calcários, para a direita, dos Solos Hidromórficos e Coluviossolos, para a esquerda. O eixo 2 destaca os Solos Argiluvitados, para cima, relativamente aos restantes grupos. Na relação com a morfologia do terreno é evidente a associação entre as unidades topográficas de bases de encosta convergentes e vales (Ut4), principalmente com os Coluviossolos (So1) mas também com os Solos Hidromórficos (So4), a que se associa a classe mais alta do índice de humedecimento (Wmx3) e uma grande proximidade às linhas de água (Dt1). Também é bem marcada a associação das unidades de alto de encosta divergentes e lineares (Ut1) aos Solos Calcários (So2) o que resultará em grande parte da ocorrência da litologia calcária (Lit2) nas zonas de maior cota. As unidades topográficas de alto de encosta convergente e de meia encosta divergente e linear (Ut2) e as de meia encosta convergente e de base de encosta divergente e linear (Ut3), já não revelam uma associação tão evidente a um grupo de solos, repartindo-se antes (tal como as classes Wmx1 e Wmx2) pelos Solos Argiluvitados (So3) e pelos Solos Calcários (So2).

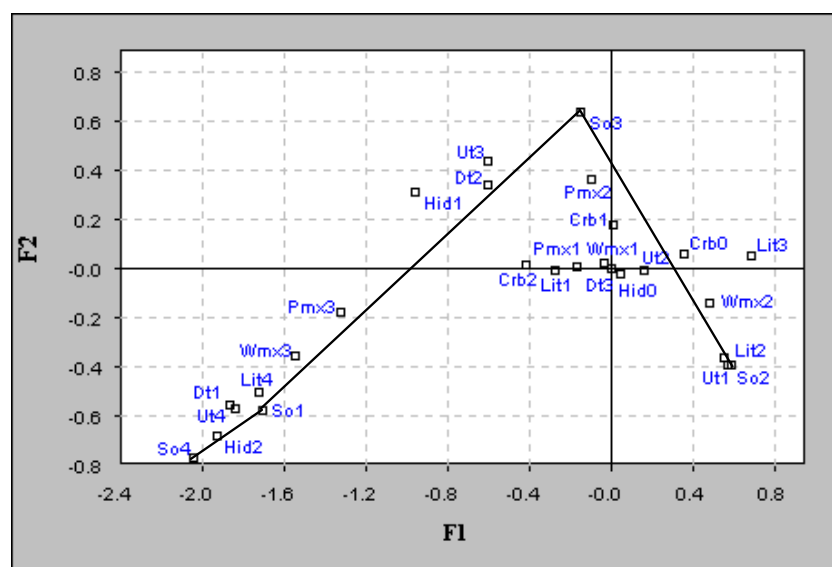


Figura 5 – AFC com a variável So (Ordens e Subordens de solos – 4 classes) como principal e as restantes variáveis em complementar.

Desta análise geral torna-se evidente que apesar das fracas correlações obtidas entre as variáveis quantitativas da morfologia do terreno e a espessura efectiva do solo, o que se pode justificar pela grande diversidade litológica e pelo intenso uso agrícola a que estes solos têm sido submetidos, a interpretação global dos resultados levando em conta outras variáveis qualitativas, relativas à litologia a características edáficas, permite

uma separação por grupos de unidades topográficas bem marcados para os casos extremos, no topo e na base das encostas, mas menos diferenciados para as situações intermédias, isto é, para as zonas de meia encosta.

CONCLUSÕES

Desta análise preliminar de relações gerais entre a morfologia do terreno e algumas propriedades morfológicas do solo (espessura efectiva e ordens/subordens da Classificação Portuguesa de Solos) aplicada aos dados disponíveis para a área em estudo, podem-se tirar as seguintes conclusões:

- Uma litologia e uma morfologia de terreno muito diversificadas, numa pequena área, a par das mobilizações para o uso agrícola destes solos, contribuem para a grande variabilidade dos solos observados.
- Não é possível estabelecer uma relação evidente entre as variáveis quantitativas da morfologia do terreno, quer sejam tomadas isoladamente quer sejam agregadas em factores explicativos obtidos pela Análise em Componentes Principais, e a espessura efectiva do solo, representada de forma aproximada pela variável Pmx.
- A percentagem de explicação obtida pela Análise Factorial de Correspondências (AFC) com as variáveis quantitativas da morfologia do terreno é apenas ligeiramente melhor do que a conseguida com as variáveis qualitativas, o que justifica um maior aprofundamento, não só na pesquisa e aplicação de variáveis quantitativas da morfologia do terreno com relevância para as propriedades do solo, mas também nas metodologias alternativas para a sua quantificação.
- Na relação das características do solo com a morfologia do terreno obtidas pela AFC, são as situações extremas que se apresentam mais bem definidas. As unidades topográficas de alto de encosta estão fundamentalmente associadas à classe de espessura mais reduzida (menor que 50 cm) e aos Solos Calcários, o que se deve em grande parte à ocorrência da litologia calcária nas zonas de maior cota. Nas unidades de bases de encosta convergentes e vales, ocorrem os solos de maior espessura (entre 80 e 120 cm), principalmente Coluviossolos, mas também Solos

Hidromórficos, a que se associa também a classe mais alta do índice de humedecimento (W).

- Nas unidades topográficas de alto de encosta convergente e de meia encosta divergentes e lineares ocorrem os solos mais delgados e intermédios (entre 50 e 80 cm), com algum predomínio dos primeiros. Nas unidades topográficas de meia encosta convergente e de base de encosta divergente e linear surgem os solos de espessura intermédia e mais espessos, também com predomínio dos primeiros. Em ambos estes tipos de unidades topográficas (também associadas às classes baixa e intermédia do índice de humedecimento) ocorrem Solos Argiluvitados e Calcários.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a colaboração do Prof. Jorge de Sousa, do Instituto Superior Técnico, do Eng. João Roma, da Dr^a. Beatriz Castor e do Sr. Custódio Alves, do Departamento de Engenharia Rural da Universidade de Évora.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bell, J.C., Cunningham, R.L & Havens, M.W. 1994. Soil drainage class probability mapping using a soil-landscape model. *Soil Sci. Soc. of Am. J.*, **58(2)**: 464-470.
- Cardoso, J. C. 1974. A Classificação dos Solos de Portugal – Nova Versão. *Boletim de Solos* 17: 14-46. SROA, Sec. de Estado da Agricultura, Lisboa.
- CVRM, Centro de Geosistemas do IST. 2002. *Programa AnDad (versão 7.10). Manual do utilizador*. Centro de Geosistemas do Instituto Superior Técnico.
- FAO, ISRIC & ISSS. 1998. *World Reference Base for Soil Resources*. World Soil Resources Report N°84. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma. 88 pp.
- FAO. 1990. *Guidelines for soil description*. 3rd ed. (revised). Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome.
- Marques da Silva, J. R., Alexandre, C., Mogo, P. & Rosado, J. 2002 Variabilidade espacial da produtividade do milho de regadio e sua relação com a topografia. *Revista de Ciências Agrárias*. SCAP (presente volume).

- McLeod M., Rijkse W.C. & Dymond J.R. 1995. A soil-landscape model for close-jointed mudstone, Gisborne-East Cape, North Island, New Zealand. *Aust. Journal of Soil Res.*, **33(3)**: 381-396.
- Moore, I.D., Gessler, P.E., Nielsen, G.A. & Peterson, G.A. 1993. Soil attribute prediction using terrain analysis. *Soil Sci. Soc. of Am. J.*, **57**: 443-452.
- Park, S.J. & Burt, T.P. 2002. Identification and characterization of pedogeomorphological processes on a hillslope. *Soil Sci. Soc. of Am. J.*, **66(6)**: 1897-1910.
- Slater, B.K., McSweeney, K., McBratney, A.B., Ventura, S.J. & Irvin, B.J. 1994. A spatial framework for integrating soil-landscape and pedogenic models. In: Bryant, R.B & Arnold, R.W. (Eds.). *Quantitative modeling of soil forming processes*. SSSA Special Publication No. 39. Madison, USA. pp.169-185.
- Thompson, J.A., Bell, J.C. & Butler, C.A. 1997. Quantitative soil-landscape modeling for estimating the areal extent of hydromorphic soils. *Soil Sci. Soc. of Am. J.*, **61(3)**: 971-980.