

cações geomorfológicas

Terrain morphology influence on soil characteristics in agricultural fields of Alentejo – application of geomorphometric classifications

Carlos Alexandre^{1,3} & José R. Marques da Silva^{2,3}

RESUMO

Neste artigo utiliza-se um Modelo de Elevação Digital (MED) para elaborar e comparar diferentes classificações da morfologia do terreno quanto ao seu potencial para a diferenciação da espessura e da textura do solo. As classificações baseiam-se em observações de campo (UTobs e PEobs-L) ou no cálculo de variáveis geomorfológicas num MED (UTx, UTx-L e PEx-L). Aplicam-se a uma área localizada a 80 km a Este de Évora, próximo de Terena, Alandroal, numa parcela cultivada com milho regado por rampa rotativa desde 1994 e com uma morfologia ondulada em que os declives variam entre 1% e 28%. Fez-se o levantamento topográfico baseado num sistema de posicionamento global, a elaboração de um MED e o cálculo de vários parâmetros geomorfológicos de âmbito local e regional. A amostragem do solo incidiu em dois blocos (A e B), segundo uma malha relativamente regular, recorrendo a uma sonda mecânica cilíndrica com 87

mm de diâmetro e 120 cm de profundidade. Os resultados da espessura do solo e da textura da camada 0-20 cm de 203 sondagens são usados para avaliar a homogeneidade e a diferenciação das unidades de terreno (UT) obtidas com as classificações morfológicas. Todas as classificações testadas se revelaram pouco eficientes a diferenciar os solos quanto à granulometria. Os resultados foram melhores na diferenciação das variáveis de espessura, em especial a profundidade máxima observada (PMX) e a profundidade até à camada R (PR), apresentando-se as classificações pela seguinte sequência qualitativa: UTobs-L > PEobs-L > PEx-L. As classificações por observação de campo obtiveram melhores resultados, mas as classificações geomorfológicas baseadas em variáveis regionais (PEx-L) foram melhores que as baseadas em variáveis locais (UTx e UTx-L). No caso da espessura, a eliminação de $UT < 100 \text{ m}^2$ melhorou sempre a resposta das classificações.

¹ Dep. de Geociências, Universidade de Évora, Apartado 94, 7002-554 Évora; e-mail: cal@uevora.pt; ² Dep. de Eng. Rural, Universidade de Évora, Apartado 94, 7002-554 Évora; ³ Instituto de Ciências Agrárias Mediterrâneas (ICAM)

ABSTRACT

This paper applies a Digital Elevation Model (DEM) to produce and compare different classifications of land morphology in respect to its potential to differentiate soil thickness and soil texture. Land morphology classifications are based on field observation (UTobs and PEobs-L) or on geomorphometric variables calculated on a DEM (UTx, UTx-L and PEx-L). They are tested in a field area located 80 km at East of Évora, near Terena, Alandroal, in a parcel cultivated with maize, irrigated by centre pivot since 1994, with an undulated morphology where slopes gradient vary between 1% and 28%. The study area was surveyed using a methodology based on the global positioning system, and a DEM was produced to calculate some local and regional geomorphometric parameters for the entire area. Soil sampling was made using a mechanical cylindrical probe with 87 mm of diameter and 120 cm of depth, and was concentrated in two sites (A and B) following a relatively regular scheme. Soil thickness and texture of the 0-20 cm layer for the 203 soil samples are used to evaluate the degree of homogeneity and differentiation of the land units (UT), defined by the morphologic classifications. None of the tested classifications is able to differentiate meaningful soil groups based only on texture (0-20 cm). Results are better for soil thickness, especially for observed maximum soil depth (PMX) and soil depth to R layer (PR), for which the qualitative sequence of classifications are as follow: UTobs-L > PEobs-L > PEx-L. Classifications based on field observation give the best results but the classifications based on geomorphometric variables of regional nature (PEx-L) are better than those based ones on local variables (UTx and UTx-L). For soil thickness, the elimination of

UT < 100 m² improved the results for all the classifications.

INTRODUÇÃO

A inferência de características do solo a partir de informação existente sobre os seus factores de formação, em especial com base em variáveis que sejam facilmente mensuráveis, tem sido objecto de estudo recorrente ao longo da história da Pedologia (Jenny, 1941; Wilding & Drees, 1983). No caso do relevo é sobejamente reconhecida a sua importância para a diferenciação dos solos, especialmente à escala da paisagem (Ricardo, 1970; Rhue, 1975; Wysocki & Schoeneberger, 2000).

A generalização dos Modelos de Elevação Digitais (MED) veio facilitar o cálculo de diversos parâmetros morfométricos da superfície do terreno, tanto à escala local como regional (Shary *et al.*, 2002). Os parâmetros morfométricos podem ser usados como variáveis independentes em relações empíricas com variáveis edáficas pertinentes, ou ainda, como critérios de classificação do terreno, permitindo obter unidades com certo grau de homogeneidade quanto à sua morfologia (Pennock & Corre, 2001; Schmidt & Hewitt, 2004). Em qualquer dos casos o objectivo final é conseguir um maior detalhe no conhecimento dos solos, considerando uma determinada densidade de amostragem ou, em alternativa, permitir a redução da amostragem necessária, uma vez definido o nível de detalhe pretendido. Tratam-se de abordagens com interesse para a produção de cartografia detalhada de solos em formato digital que, a par de outras técnicas (McBratney *et al.*, 2003), permitem reduzir os custos deste tipo de cartografia e, portanto, contribuem para a sua generalização. Aumentar o detalhe na caracterização da

variabilidade espacial do recurso solo é indispensável para conseguir aproveitar as potencialidades de modelos cada vez mais sofisticados, como os modelos hidrológicos, de erosão ou de crescimento de culturas, ou ainda, para aproveitar as técnicas da agricultura de precisão cada vez mais versáteis a lidar com a diversidade do terreno.

Este artigo tem como objectivos: a) analisar a capacidade de explicação de variáveis edáficas a partir de variáveis morfo-métricas e litológicas; b) caracterizar os solos da área em estudo, quanto à sua espessura e textura (0-20 cm), por classes litológicas e por classes morfológicas do terreno obtidas com diferentes classificações; c) comparar classificações da morfologia do terreno, obtidas por observação de campo e por cálculo de variáveis geomorfométricas num MED, quanto ao seu potencial para diferenciar os solos pela sua espessura e textura.

MATERIAIS E MÉTODOS

A área deste estudo localiza-se 80 km a Este de Évora, próximo de Terena, Alandroal. Trata-se uma folha da herdade do Pigeiro, cultivada com milho regado por rampa rotativa desde 1994 e com uma morfologia muito ondulada em que os declives variam entre 1% e 28% (Figura 1).

Com vista à elaboração de um Modelo de Elevação Digital (MED) da área efectuou-se o levantamento topográfico com 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. O mesmo sistema também foi usado para a localização da amostragem do solo. O MED envolveu as seguintes etapas: (i) levantamento com GPS numa densidade de amostragem de 5 m na linha e 15 m na

entrelinha, (ii) importação das coordenadas dos pontos para “ArcView” (ESRI, 1999); (iii) cálculo de uma rede irregular de triângulos (“TIN”) e conversão para um modelo de elevação numérico, com resolução de 1 m, através da extensão “Spatial Analyst” do “ArcView”; (iv) suavização do MED com um filtro 3x3 e eliminação de eventuais depressões fechadas (“sinks”) usando a extensão “Hydrological modeling”.

No Quadro 1 indicam-se as variáveis geomorfométricas de natureza local e regional (Shary *et al.*, 2002) calculadas a partir do MED. No primeiro grupo inclui-se o declive (S), a curvatura vertical ou segundo o perfil de maior declive (kv), a curvatura no plano horizontal (kpl) e a curvatura média (H). Estas variáveis foram calculadas com base nas soluções numéricas de Eyton (1991) e, no caso das curvaturas, adoptou-se a convenção de Shary *et al.* (2002) segundo a qual valores negativos indicam formas de relevo côncavas e valores positivos indicam formas de relevo convexas. As restantes variáveis incluem-se no grupo de variáveis regionais. O comprimento das linhas de escoamento (Lesc) dá a distância da linha de fecho até ao ponto considerado. A área contributiva específica (AC) dá a área a montante que contribui com escoamento superficial para um dado ponto, por unidade de largura (1 m, atendendo à resolução adoptada para o MED). Lesc e AC correspondem às funções “flow length” e “flow accumulation” da extensão “Hydrological modeling” do “ArcView”, exigindo a execução prévia da função “flow direction” que faz a delimitação da rede de escoamento superficial com base no “conventional D8 steepest descent algorithm” (Jenson & Domingue, 1988; Burrough & McDonnell, 1998). Foram ainda calculados dois índices adimensionais: o índice de humedecimento (‘wetness index’, W) e o índice potência do

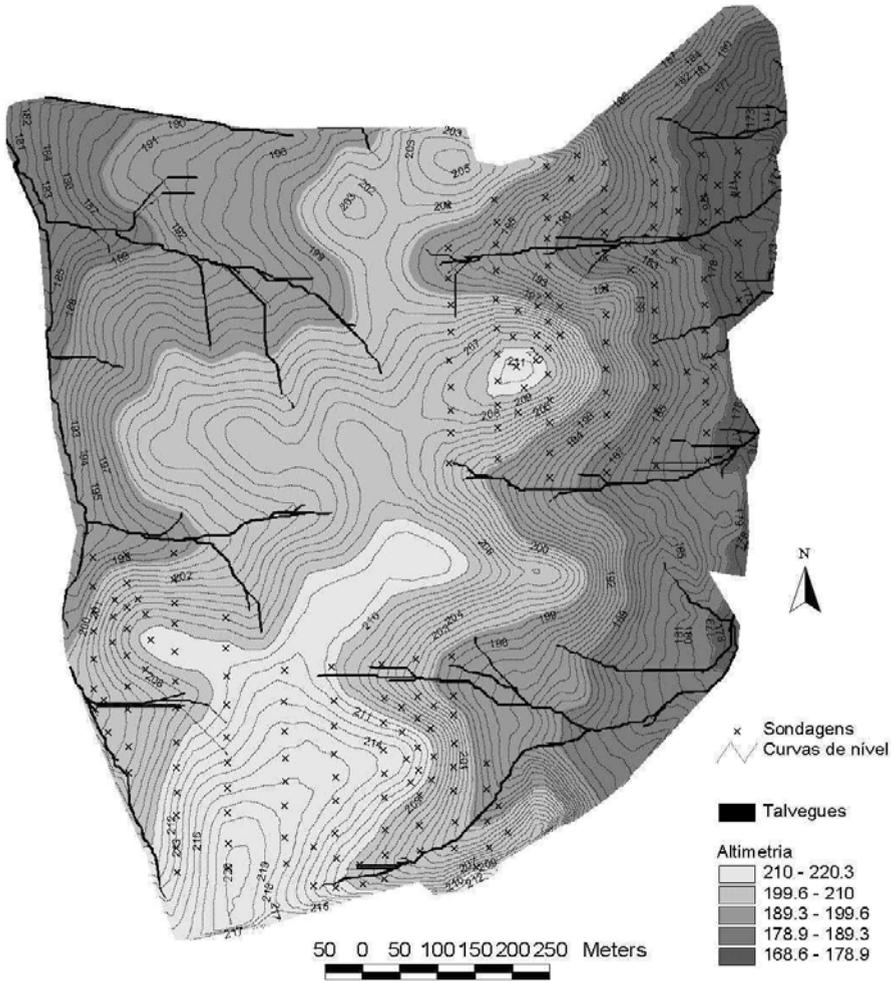


Figura 1 – Altimetria da área de estudo com destaque das linhas de água e dos pontos de localização das sondagens para caracterização do solo nos blocos A (a sul) e B (a nordeste).

escoamento ('stream power index', SP), dados por $W = \ln(100 AC/S)$ e $SP = AC S/100$, sendo S o declive (%) e AC a área contributiva específica (m) (Beven & Kirkby, 1979; Moore *et al.*, 1993).

A área do estudo é bastante diversificada do ponto de vista geológico, com os

seguintes estratos cartografados (SGP, 1974): Oligocénico em especial no topo de colinas, onde ocorrem calcários não compactos; Devónico constituídos por xistos e grauvaques, por vezes com conglomerados; aluviões modernos junto das maiores linhas de água. No Quadro 1 indicam-se os principais grupos litológicos observados.

QUADRO 1 – Variáveis usadas na descrição da morfologia do terreno, litologia e solos

Variáveis da morfologia do terreno		
(1)		
4	S	Declive (%)
5	kpl	Curvatura no plano horizontal (1/m); >0 divergente, <0 convergente ⁽²⁾
6	kv	Curvatura vertical (ou “profile curvature”) (1/m); >0 convexa, <0 concava ⁽²⁾
7	H	Curvatura média (1/m) ⁽²⁾
8	Lesc	Comprimento das linhas de escoamento até ao ponto considerado (m)
11	lgAC	Logaritmo da área contributiva específica com escoamento superficial (m ² /m)
12	W	Índice de humedecimento (‘wetness index’ ou ‘complex topographic index’)
13	SP	Índice potência do escoamento (‘stream power’)
Variáveis do solo e litologia		
16	PMX	Profundidade máxima observada
	PR	Profundidade até R (ou RC); aprox. equivalente à espessura efectiva
	EC	Espessura do material originário (de CB a CR)
37	EG ₀₋₂₀	Percentagem de elementos grosseiros na camada 0-20 cm
30	AG ₀₋₂₀	Percentagem de areia grossa na camada 0-20 cm
31	AF ₀₋₂₀	Percentagem de areia fina na camada 0-20 cm
32	Lim ₀₋₂₀	Percentagem de limo na camada 0-20 cm
33	Arg ₀₋₂₀	Percentagem de argila na camada 0-20 cm
38	Lit	Material originário do solo (na ACP 41 e 43 estão agrupadas na classe 4)
	1	Calcários
	2	Xistos associados a depósitos calcários
	3	Xistos
	41	Depósitos de textura fina sobre calcários ou derivados de calcários
	43	Depósitos de textura fina sobre xisto ou derivados de xistos
39	Crb	Carbonatos no horizonte Ap (classes 0, 1 e 2)

(1) Numeração usada na Análise de Componentes Principais (ACP) c/ programa AnDad (CVRM, 2002);

(2) Segundo a convenção de Shary *et. al.* (2002).

A amostragem do solo concentrou-se em dois blocos: bloco A a sul e bloco B a nordeste (Figura 1), respectivamente com uma área de 26 e 24 ha. Adoptou-se uma malha relativamente regular e sistemática com maior densidade nas zonas de muito baixa e muito alta produtividade. Através de uma sonda mecânica cilíndrica recolheram-se, no total, 211 monólitos de solo com 87 mm de diâmetro e 120 cm de profundidade máxima. Depois de eliminar 8 casos duvidosos por incerteza quanto a alguns dos dados obtidos, foram utilizadas neste trabalho 203 sondagens. Mediante a observação dos monólitos fez-se uma descrição sumária

das principais características morfológicas do solo adoptando a metodologia da FAO (1990). Procedeu-se à análise de textura dos dois horizontes superficiais pelo método da análise mecânica, usando um aparelho Sedigraph para a determinação da granulometria inferior a 0,1 mm (Alexandre *et al.*, 2001). Todas as variáveis edáficas consideradas estão listadas no Quadro 1.

Os solos observados enquadram-se nas seguintes Ordens ou Subordens da Classificação dos Solos de Portugal (Cardoso, 1974) com a respectiva correspondência para a WRBSR (FAO *et al.*, 1998): Colúviosolos (Regossolos de origem colúvia);

Solos Calcários (Regossolos e Cambissolos Calcários); Solos Argiluvitados Pouco Insaturados (Luvisolos); alguns Solos Hidromórficos (unidades estagnicas de diversos grupos).

Classificações da morfologia do terreno

Comparam-se diferentes sistemas de classificação da morfologia do terreno conforme se resume no Quadro 2. As classificações consideradas permitem enquadrar cada local numa de 11 Unidades de Terreno (UT) e numa de 5 Posições de Encosta (PE-L) definidas de acordo com Rhue (1975) e Wysocki & Schoeneberger (2000) entre outros. As UT consideradas compreendem áreas de cumeada (C), talvegues (T) e áreas de encosta (E), subdividindo-se estas em 9 formas possíveis, consoante são convexas (X), planas (P) ou côncavas (V), segundo a direcção longitudinal, e divergentes (D), planas (P) ou convergentes (C), segundo a direcção transversal. No total as 9 formas possíveis são: XD, XP, XC, PD, PP, PC, VD, VP, VC. As PE-L incluem também as áreas de cumeada, talvegues e áreas de encosta, com estas últimas subdivididas em áreas de alto de encosta (AE), meia-encosta (ME) e base de encosta (BE).

O primeiro método de classificação aplicado é o mais comum e baseia-se na observação do local no momento de recolha das amostras, seguindo-se uma segunda apreciação pela localização de cada ponto de amostragem no MED (UTobs e PEobs).

Os outros métodos de classificação baseiam-se na aplicação de critérios geomorfométricos calculados a partir do MED conforme se resume no Quadro 2 (UTx, UTx-L e PEx-L). Os critérios indicados na parte superior do Quadro 2 são comuns aos três métodos de classificação geomorfométrica usados e permitem definir as UT, cumeadas, talvegues e encostas com base nas variáveis área contributiva específica (AC) e declive (S). Os métodos diferenciam-se quanto aos critérios aplicados na classificação das áreas de encosta (parte inferior do Quadro 2): a) no primeiro sistema de classificação (UTx) as áreas de encosta são classificadas nas 9 formas possíveis, usando as duas curvaturas do terreno kv e kpl; b) nas classificações UTx-L procura-se avaliar se as unidades de terreno obtidas na classificação anterior (UTx) permitem traduzir também as posições na encosta a partir das três formas possíveis das UT segundo a direcção longitudinal: forma convexa (XD, XP, XC), plana (PD, PP, PC) e concava (VD, VP, VC); c) nas classificações PEx-L as unidades de terreno de encosta são classificadas numa das três classes de posição na encosta (AE, ME e BE) com base em critérios aplicados aos declives relativos para montante (σ_m) e para jusante (σ_j) de um dado ponto P, segundo as linhas de escoamento, conforme se desenvolve no texto que se segue. Enquanto as classificações UTx e UTx-L se baseiam em critérios locais, as curvaturas da superfície do terreno, as PEx-L

QUADRO 2 – Classificações morfológicas do terreno e métodos aplicados.

Métodos de Classificação	Área mín. (m ²)	Unidade Terreno ⁽¹⁾	Posição na Encosta, na Direcção Longitudinal ⁽²⁾	
Por observação	Não def.	UTobs	PEobs-L	
Por cálculo	1	UT1	UT1-L	PE1-L
	100	UT100	UT100-L	PE100-L

(1) 11 classes UT definidas pela forma do terreno (9 classes) mais Cumeada e Talvegue;

(2) 5 classes na direcção longitudinal: Alto, Meia e Base da Encosta, Cumeada e Talvegue;

recorrem a critérios regionais (Shary *et al.*, 2002) pela análise das linhas de escoamento (“flow length”), como representação do perfil das encostas. Os números 1 e 100, nas classificações geomorfométricas correspondem à área mínima permitida às UT obtidas, 1 m² e 100 m² respectivamente.

Classificação PE-L

A metodologia adoptada para definir a posição na encosta (PEX-L) baseia-se na localização dos pontos de inflexão ao longo das linhas de escoamento sem recurso a derivadas, dado que estas constituem uma informação local que não abrange o perfil total da encosta (ou da linha de escoamento) e são muito condicionadas por pequenas irregularidades do terreno, tanto reais como induzidas pelo MED. Em alternativa recorreu-se a relações geométricas simples aplicadas a cada linha de escoamento. Para cada uma temos o comprimento total de montante até ao talvegue mais próximo (L_T) e o respectivo desnível (Z_T). Em cada ponto P situado na encosta (Figura 2) são definidas as seguintes variáveis para jusante: distância (L_{jt}) e desnível (Z_{jt}) segundo a linha de escoamento até ao talvegue mais próximo. Analogamente, temos para montante: a distância (L_m) e o desnível (Z_m) segundo a linha de escoamento até à área de cumeada.

$$Z_T = Z_{jt} + Z_m \quad \text{e} \quad L_T = L_{jt} + L_m$$

Com estas variáveis obtém-se o declive médio da encosta, mais correctamente da linha de escoamento total (S_T), bem como os declives médios da linha de escoamento para jusante do ponto P (S_{jt}) e para montante do ponto P (S_m), respectivamente:

$$S_T = Z_T / L_T; S_{jt} = Z_{jt} / L_{jt} \text{ e } S_m = Z_m / L_m$$

O desnível ΔZ_{TP} representa a diferença entre a cota efectiva do ponto P e a cota a que este ponto estaria se a encosta tivesse um declive constante e igual ao seu declive

médio S_T. Este desnível pode ser obtido por duas vias complementares:

$$\Delta Z_{TP} = Z_{jt} - Z_{TP} = S_{jt}L_{jt} - S_T L_{jt} = (S_{jt} - S_T)L_{jt}$$

$$\Delta Z_{TP} = (Z_T - Z_{TP}) - Z_m = S_T L_m - S_m L_m = (S_T - S_m)L_m$$

Portanto, pode-se concluir que:

$$\Delta Z_{TP} = (S_{jt} - S_T)L_{jt} = (S_T - S_m)L_m$$

Resulta, por convenção, que o desnível ΔZ_{TP} dá positivo nas partes convexas da linha de escoamento e negativo nas partes côncavas. O valor de ΔZ_{TP} atinge o máximo no ponto mais convexo da encosta e o mínimo no ponto mais côncavo. Contudo, tratando-se de valores absolutos, que diferem para cada linha de escoamento, é difícil estabelecer um critério geral aplicável à totalidade de uma área.

Com vista a obter um critério genérico procedeu-se à adimensionalização das variáveis distância e declive para jusante e montante do ponto P fazendo:

$$\lambda_{jt} = L_{jt} / L_T \quad \text{e} \quad \lambda_m = L_m / L_T$$

$$\sigma_{jt} = S_{jt} / S_T \quad \text{e} \quad \sigma_m = S_m / S_T$$

Procedendo do mesmo modo para o desnível ΔZ_{TP} obtemos o desnível relativo Δζ_{TP} em que o declive médio relativo da linha de escoamento tem o valor 1:

$$\Delta \zeta_{TP} = (\sigma_{jt} - 1) \lambda_{jt} = (1 - \sigma_m) \lambda_m$$

As Unidades de Terreno de Encosta são subdivididas em unidades de alto da encosta (AE), meia-encosta (ME) e base da encosta (BE), recorrendo às diferenças (σ_{jt} - 1) e (1 - σ_m) cujos resultados se podem situar, teoricamente, nos intervalos:

$$(\sigma_{jt} - 1) \in]-1, \infty[\quad \text{e} \quad (1 - \sigma_m) \in]-\infty, 1[$$

Na área em estudo os limites obtidos não ultrapassam as 5 unidades, em valor absoluto. A estrutura espacial dos valores de (σ_{jt} - 1) e (1 - σ_m) reflecte as descontinuidades próprias das linhas de escoamento obtidas pelo “conventional D8 steepest descent algorithm” (Jenson & Domingue, 1988; Burrough & McDonnell, 1998). Para conferir maior homogeneidade aos

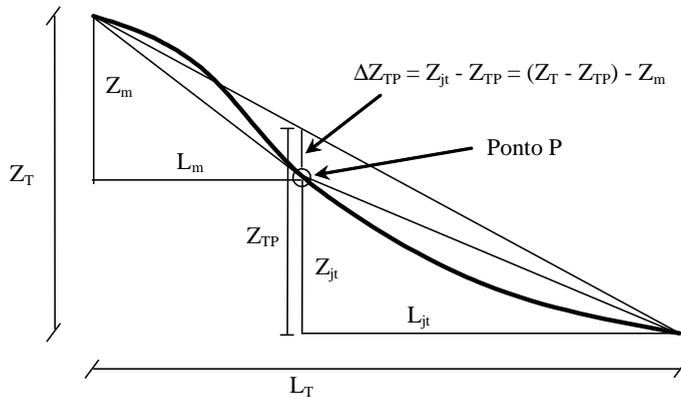


Figura 2 – Esquema com a representação das variáveis morfométricas consideradas para a classificação das áreas de Alto de Encosta, Meia-Encosta e Base de Encosta (ver significado no texto).

resultados aplicou-se por duas vezes um filtro de média 3x3 àqueles valores antes da sua utilização como critérios de delimitação

das três posições de encosta (Quadro 3). Por último foram removidas as áreas inferiores a 100 m².

QUADRO 3 – Variáveis e critérios das classificações morfométricas do terreno. AC, área contributiva; S, declive; kv e kpl, curvaturas vertical e plana; σ_m e σ_{jt} , declives relativos para montante e jusante de qualquer ponto P, na linha de escoamento.

Classe	Unidade Terreno	AC (m ²)	S (%)	kv 1/m	kpl 1/m	Posição Encosta	(1 - σ_m)]-a, 1[($\sigma_{jt} - 1$)]-1, a[
Classificação Unidades de Terreno – critérios comuns às classificações UT, UT-L e PE-L								
11	T	>500	-	-	-	-	-	-
10	C	≤500	≤2	-	-	-	-	-
(1-9)	E	≤500	>2	-	-	-	-	-
Classificação das Unidades de Terreno de Encosta com base em:								
Critérios locais (classificações UT e UT-L)					Critérios regionais (classif. PE-L)			
1	XD	“	“	>0,1	>0,1			
2	XP	“	“	>0,1	≥-0,1; ≤0,1	AE	>0,1	-
3	XC	“	“	>0,1	<-0,1			
4	PD	“	“	≥-0,1; ≤0,1	>0,1			
5	PP	“	“	≥-0,1; ≤0,1	≥-0,1; ≤0,1	ME	≤0,1	≥-0,1
6	PC	“	“	≥-0,1; ≤0,1	<-0,1			
7	VD	“	“	<-0,1	>0,1			
8	VP	“	“	<-0,1	≥-0,1; ≤0,1	BE	-	<-0,1
9	VC	“	“	<-0,1	<-0,1			

Legenda das Unidades de Terreno:

Curvatura no sentido longitudinal (kv, curvatura vertical):

X – superfície convexa

P – superfície plana

V – superfície concava

Curvatura no sentido transversal (kpl, curvatura plana):

D – superfície divergente

P – superfície plana

C – superfície convergente

T – Talvegues

C – Cumeadas

E – Encostas, subdividida em:

AE – Alto da encosta

ME – Meia-encosta

BE – Base da encosta

a – valores obtidos <5]

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Análise de Componente Principais (ACP) (programa AnDad, CVRM, 2002) às variáveis da morfologia do terreno e da litologia (Quadro 1) mostra uma capacidade de explicação do quadro geral dos dados de cerca de 70% nos dois primeiros factores e 82% com o terceiro. Observa-se na Figura 3a uma correlação inversa, imperfeita, entre os grupos de variáveis geomorfométricas locais e regionais (Shary *et al.* 2002): à direita as curvaturas do terreno (4, 5 e 6) e à esquerda o comprimento das linhas de escoamento, a área contributiva e o índice de humedecimento (8, 11 e 12).

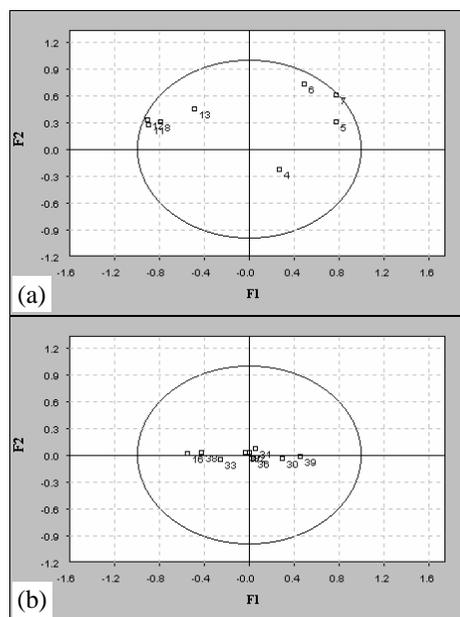


Figura 3 – Análise de Componentes Principais às variáveis da morfologia do terreno e da litologia (a) e com as variáveis edáficas, projectadas em suplementar (b) (ver Quadro 1).

Maiores curvaturas indicam áreas mais convexas e divergentes logo, com menores valores das variáveis do segundo grupo.

Contudo, as variáveis edáficas, projectadas em suplementar (Figura 3b) não ficam suficientemente bem explicadas com os dois primeiros factores da ACP.

Morfologia do terreno e litologia

Analisando a litologia para cada uma das pequenas bacias hidrográficas da área em estudo observa-se (Figura 4), de montante para jusante, a sequência: calcários (1), xistos associados a depósitos calcários (2), xistos (3) e depósitos de textura fina (4), embora em algumas bacias não se encontrem todos os grupos de litologia referidos.

Solos e litologia

Tomando por base os dados do Quadro 4, verifica-se que os solos derivados de calcários e de xistos associados a calcários são os mais delgados, ambos com cerca de 42 cm de espessura média até à rocha consolidada (PR). Os solos derivados de xistos apresentam uma PR média de 53 cm, mas têm muito maior variabilidade do que os dois grupos anteriores. Esta pequena diferença pode resultar da maior concentração de solos derivados de materiais calcários nas zonas mais altas das encostas em cada bacia (Figura 4). Os solos derivados de depósitos de vertente são os mais espessos, com PR médias de 92 e 78 cm respectivamente, se esses depósitos são de natureza calcária ou xistosa. O aumento de PR associa-se a maior espessura do material originário (EC).

A quantidade de elementos grosseiros na camada 0-20 cm é sempre muito elevada em todos os grupos de solos indicados, sendo de salientar uma certa tendência contrária nos depósitos de vertente. Enquanto os solos de depósitos de origem calcária tendem a concentrar elementos

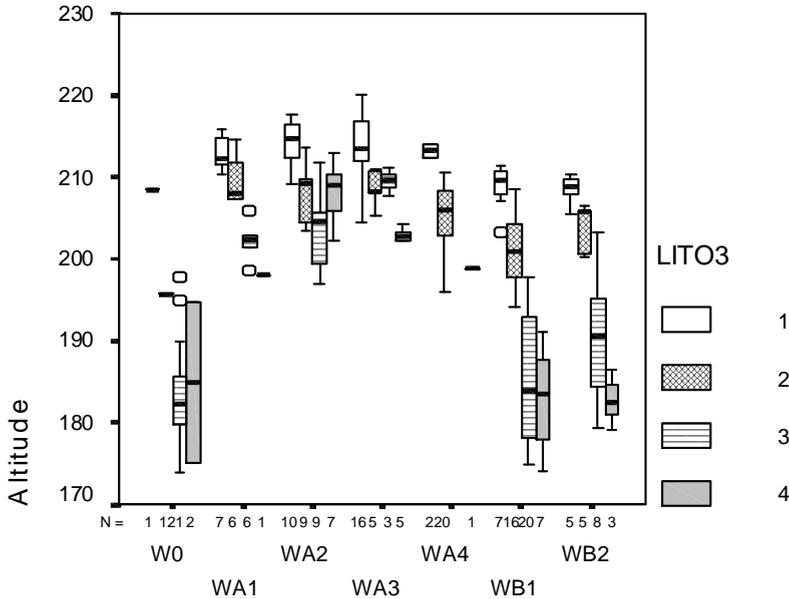


Figura 4 – Variação da litologia com a altitude para cada mini-bacia hidrográfica. WA1 a WA4: bacias da área A; WB1 e WB2: bacias da área B; W0: pontos isolados, maior parte da área B. Litologia: 1- calcários; 2- xistos com calcários; 3-xistos; 4- depósitos de materiais finos.

grosseiros – apresentam percentagens mais elevadas do que os correspondentes solos de calcários e de xistos associados a calcários – os solos de depósitos de origem xis-

tosa apresentam menor percentagem do que os solos derivados de xistos. Isto poderá reflectir diferenças nos processos de acumulação desses depósitos.

QUADRO 4 – Valores médios, desvios padrão e número de amostras de cada variável edáfica (ver Quadro 1) obtidos para as classes de litologia observadas.*

		PMX	PR	EC	EG ₀₋₂₀	AG ₀₋₂₀	AF ₀₋₂₀	Lim ₀₋₂₀	Arg ₀₋₂₀
Calcários	\bar{x}	44,8	41,7	6,8	51,0	21,6	15,4	31,6	31,2
	s	12,8	12,6	10,5	8,3	6,8	6,5	6,7	7,9
	N	48	48	48	40	48	48	48	48
Xistos assoc. calcários	\bar{x}	47,0	41,8	6,7	46,6	16,9	14,1	37,2	31,8
	s	9,7	10,4	8,6	7,2	4,5	3,4	4,5	6,9
	N	62	62	62	59	59	59	59	59
Xistos	\bar{x}	63,1	53,4	14,6	50,2	19,4	14,1	36,9	29,4
	s	18,6	22,1	14,9	7,9	6,4	3,6	6,6	9,3
	N	67	67	67	61	67	67	67	67
Depósitos text. fina assoc. calcários	\bar{x}	93,2	91,6	56,2	54,9	18,3	14,8	28,0	38,9
	s	9,2	10,6	13,2	5,8	5,0	2,7	3,5	4,3
	N	13	13	13	11	13	13	13	13
Depósitos text. fina assoc. a xistos	\bar{x}	80,8	78,1	32,5	44,8	11,2	14,1	44,7	30,0
	s	11,0	13,1	23,3	5,9	4,2	3,3	4,3	6,1
	N	13	13	13	12	13	13	13	13

* Anova rejeita igualdade das médias para todas as variáveis, com $P < 0,01$, excepto para AF₀₋₂₀.

Os solos derivados de materiais originários com xisto apresentam maior proporção de limo que os grupos equivalentes derivados de materiais calcários. Essa diferença é particularmente notória quando se comparam os solos derivados de depósitos de natureza xistosa, $\bar{x} \approx 45\%$ de limo, com os de natureza calcária, $\bar{x} \approx 28\%$, estes com mais argila e areia grossa. Comparando os solos de depósitos com os outros solos, é evidente o enriquecimento em limo no caso dos solos de materiais xistosos e em argila no caso dos solos de materiais calcários. Esta observação, conjugada com a anterior sobre os elementos grosseiros, pode indiciar a maior influência de processos de erosão hídrica selectiva, relativamente recentes, na acumulação dos materiais que constituem a camada 0-20 cm nos solos formados sobre depósitos de xisto.

Solos e morfologia do terreno

Ao aplicar diferentes sistemas de classificação da morfologia do terreno (Quadro 2) é necessário comparar a eficácia das

classificações, não só quanto a uma correcta correspondência entre UT classificadas e reais, mas também quanto à capacidade das UT obtidas para definir classes com maior homogeneidade de solos. O Quadro 5 inclui as correlações intra-classes estimadas para as classificações e para as variáveis edáficas em estudo. A correlação intra-classes é uma medida da correlação entre indivíduos da mesma classe e pode ser estimada por r_i , a partir dos valores da análise de variância (Webster & Oliver, 1990). O valor de r_i atinge o máximo teórico de 1 quando cada classe é uniforme, o que é muito raro. A correlação intra-classes tem um valor mínimo de 0, mas o estimador r_i pode atingir valores negativos. Tal sucede quando o quadrado médio das diferenças entre classes é menor que o quadrado médio das diferenças dentro das classes, o que traduz uma classificação com muito pouco interesse.

Verifica-se que todas as classificações morfológicas são pouco eficientes a diferenciar os solos pelas variáveis granulométricas. Os resultados são melhores na diferenciação com as variáveis de espessura,

QUADRO 5 – Correlações Intra-classes usadas como indicadoras da homogeneidade das classes obtidas pela aplicação de diferentes classificações morfológicas do terreno (Quadro 2) para cada uma das variáveis edáficas indicadas no Quadro 1.

Classificação	PMX	PR	EC	EG ₀₋₂₀	AG ₀₋₂₀	AF ₀₋₂₀	Lim ₀₋₂₀	Arg ₀₋₂₀
UTobs	**0,53	**0,52	**0,43	0,01	**0,16	**0,20	**0,17	**0,13
UT1	**0,13	**0,10	**0,11	-0,02	0,04	0,05	0,04	**0,09
UT100	**0,28	**0,25	**0,13	0,01	**0,10	-0,03	0,01	**0,07
PEobs-L	**0,52	**0,51	**0,48	0,02	**0,10	0,04	**0,20	0,03
UT1-L	**0,17	**0,14	**0,15	-0,03	*0,04	-0,01	-0,02	**0,08
UT100-L	**0,28	**0,26	**0,16	-0,03	**0,12	-0,02	-0,02	**0,08
PE1-L	**0,38	**0,34	**0,25	-0,02	**0,09	0,00	*0,05	*0,05
PE100-L	**0,42	**0,36	**0,27	-0,02	**0,09	0,00	*0,04	*0,05

Nota: Anova rejeita igualdade das médias das classes obtidas com $P < 0,05$ (*) e $P < 0,01$ (**).

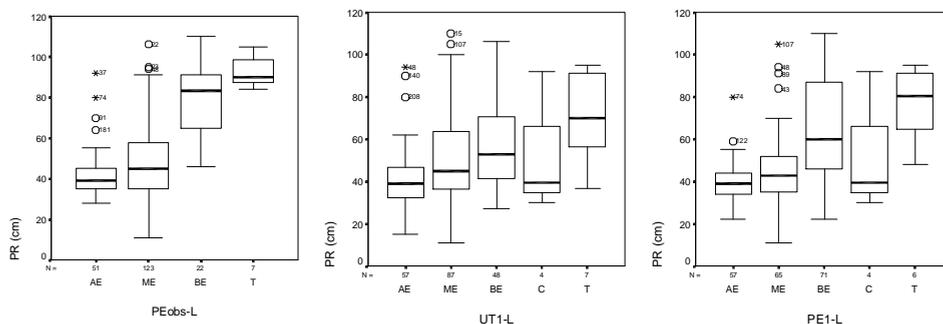


Figura 5 – Distribuição de PR (profundidade do solo até R) para cada uma das classes de Posição de Encosta definidas pelas classificações PEobs-L, UT1-L e PE1-L (ver Quadro 2).

em especial com PMX e PR, apresentando-se as melhores classificações pela sequência: UTobs-L > PEobs-L > PE100-L > PE1-L. A Figura 5 exemplifica estes resultados comparando as classes obtidas no caso da variável PR com as classificações PEobs-L, UT1-L e PE1-L. Verifica-se que UT1-L é claramente inferior às restantes duas classificações e que PE1-L se aproxima bastante de PEobs-L, apesar de algumas diferenças relativamente a esta: PE1-L apresenta áreas de cumeada, tal como as outras classificações geomorfológicas, enquanto nas classificações por observação essas áreas foram consideradas de alto de encosta; PE1-L parece permitir maior variabilidade da espessura de solo nas áreas de talvegue e de base de encosta; em contrapartida, é mais restritiva nas áreas de meia-encosta. Estes dois últimos aspectos resultam, em parte, dos valores numéricos adoptados como critérios de classificação (Quadro3) e que podem ser objecto de melhor afinação.

As classificações baseadas na observação revelaram melhores resultados, mas as classificações geomorfológicas baseadas em critérios regionais (PEX-L) são mais eficientes que as baseadas em critérios locais (UTx e UTx-L). Estes resultados são explicáveis pelo facto das classificações

UT, calculadas apenas com base nas curvaturas, serem muito sensíveis a variações da morfologia do terreno com pouco significado e também a padrões artificiais, incluindo erros, que ocorrem na estrutura de dados do MED (Shary *et al.*, 2002). No caso das variáveis de espessura do solo, a eliminação de UT com áreas <100 m² melhorou sempre a resposta das classificações.

A Figura 6 mostra como se distribuem as UT obtidas pela classificação PE100-L, verificando-se uma grande coerência geral na sua distribuição ao longo das encostas. Evidencia-se também que a proporção relativa das UT de base de encosta podem ser bastante variáveis, com tendência para ocuparem áreas porventura excessivas em encostas cujo limite superior coincide com o limite da área de estudo, o que sugere que possam estar sujeitas a erros decorrentes desse limite artificial.

Como se mostra no Quadro 5, a Anova indica diferenças muito significativas ($P < 0,01$) entre as médias das classes obtidas pela classificação PE100-L, em todas as variáveis de espessura do solo (PMX, PR e EC) e também na percentagem de areia grossa. Indica ainda diferenças significativas ($P < 0,05$) nas percentagens de limo e argila. No Quadro 6 especificam-se

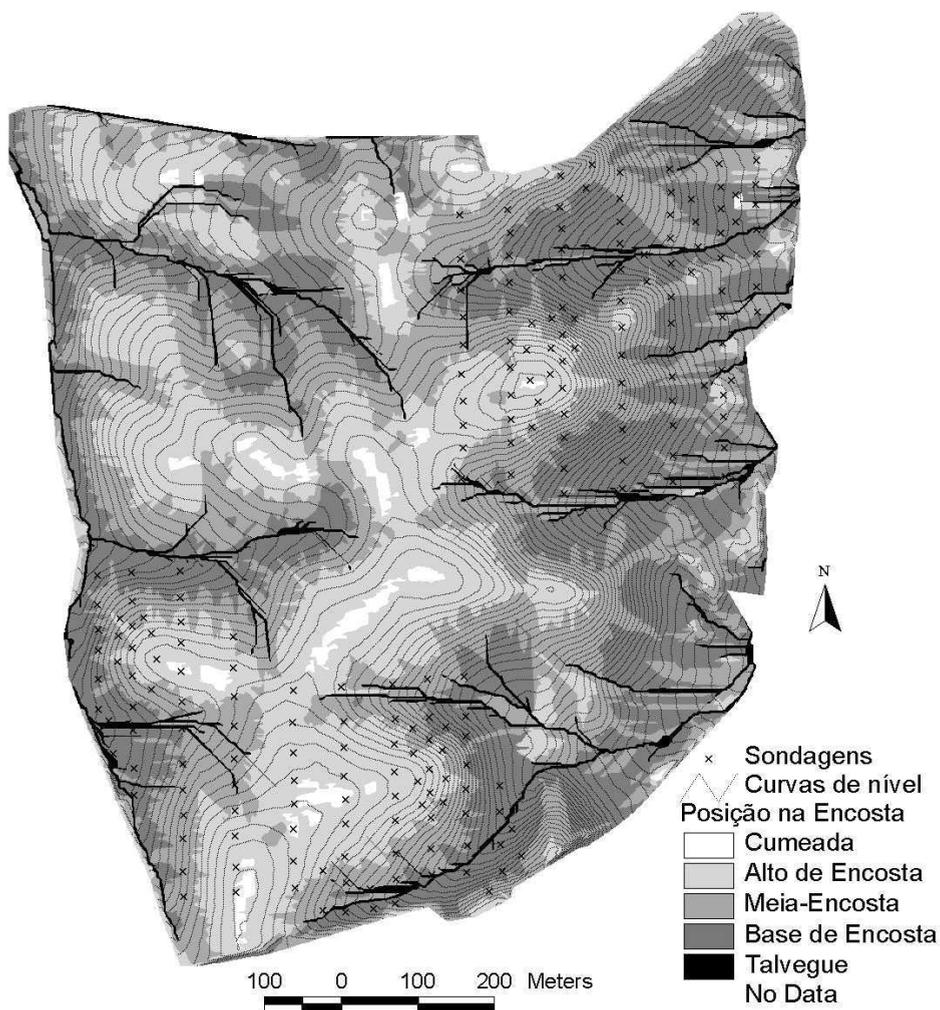


Figura 6 – Unidades de Terreno de Cumeada, Alto de Encosta, Meia-Encosta, Base de Encosta e Talvegue definidas pela classificação geomorfométrica PE100-L (ver Quadro 2).

os valores médios, desvios padrão e número de perfis de cada uma das classes obtidas pela classificação geomorfométrica PE100-L.

Os valores da espessura PR não diferem muito do exemplo da Figura 4, relativo à classificação PE1-L. Conforme seria

expectável verifica-se um aumento do valor médio da profundidade até R desde o alto de encosta até à base de encosta e talvegue. As áreas de alto de encosta apresentam os solos com menor espessura (PR média \approx 39 cm e coeficiente variação relativamente baixo, 24%). Nas áreas de base

QUADRO 6 – Valores médios, desvios padrão e número de amostras das variáveis edáficas (ver Quadro 1) obtidas para cada unidade de terreno resultante da classificação morfométrica PE100-L (ver Quadro 2).

		PMX	PR	EC	EG ₀₋₂₀	AG ₀₋₂₀	AF ₀₋₂₀	Lim ₀₋₂₀	Arg ₀₋₂₀
Cumeada	\bar{x}	56,0	50,3	14,8	49,0	23,2	15,1	38,2	23,6
	s	24,2	28,2	25,1	3,2	8,7	4,4	7,1	6,1
	N	4	4	4	3	4	4	4	4
Alto	\bar{x}	43,3	39,4	5,9	49,4	20,8	15,4	33,6	30,1
	s	9,8	9,4	8,6	7,7	6,6	6,5	7,1	7,2
	N	56	56	56	49	53	53	53	53
Meia	\bar{x}	51,8	44,3	9,4	48,3	18,5	14,0	35,5	31,9
	s	15,6	15,9	9,7	8,6	5,5	3,1	5,9	8,2
	N	64	64	64	58	64	64	64	64
Base	\bar{x}	70,2	64,1	22,4	49,4	17,1	14,3	37,2	31,1
	s	19,5	23,2	22,8	7,8	6,2	3,4	7,0	8,4
	N	73	73	73	67	73	73	73	73
Talvegue	\bar{x}	77,5	76,7	41,8	52,0	13,7	13,1	33,6	39,5
	s	18,5	18,7	21,6	4,7	3,3	3,1	7,9	5,8
	N	6	6	6	6	6	6	6	6

de encosta e junto dos talwegues os solos apresentam a maior espessura, com PR de cerca de 64 e 77 cm respectivamente. As áreas de base de encosta apresentam maior variabilidade, com coeficiente de variação de 36% contra 24% nas áreas de talvegue, o que se pode justificar pela maior diversidade de situações morfológicas nessas áreas, bem como pelo maior número de casos observados. Os solos das áreas de cumeada apresentam maior espessura média que as áreas de alto de encosta e meia-encosta, no entanto, estas áreas representam uma pequena proporção da área total, abrangendo apenas 4 perfis, que revelam, também, a maior variabilidade registrada (PR média \approx 50 cm e coeficiente de variação de 56%). Parece ser evidente ainda que o aumento da profundidade PR se deve essencialmente ao aumento da espessura do material originário do solo (EC).

Relativamente à textura do solo, evidenciam-se duas tendências complementares, por um lado, o decréscimo da percentagem de areia grossa dos solos de cumeada (23%) para os solos junto dos talwegues (14%) e, por outro lado, segundo o mesmo sentido, o aumento da per-

centagem de argila de cerca de 24% nos solos de cumeadas, para quase 40% nos solos de talwegues. Em todo o caso é de salientar o elevado grau de variabilidade intraclases, no caso da areia grossa com coeficientes de variação entre os 24% (talwegues) e 38% (cumeadas) e no caso da argila, com coeficientes de variação entre os 15% (talvegue) e 27% (base de encosta).

CONCLUSÕES

Os dois primeiros factores da ACP obtidos a partir de variáveis geomorfométricas e da litologia não mostram relações evidentes com as variáveis edáficas analisadas – profundidade e textura da camada 0-20 cm.

Da caracterização dos solos por classes de litologia destaca-se: a profundidade média até R (PR) aumenta pela sequência, solos derivados de calcários e derivados de xistos associados a calcários < solos derivados de xistos < solos derivados de depósitos; esta sequência incorpora alguma influência da morfologia do terreno

dado que a litologia se estrutura do mesmo modo de montante para jusante nas bacias hidrográficas da área em estudo; a camada 0-20 cm dos solos formados em depósitos de origem calcária tende a concentrar elementos grosseiros e argila, enquanto os solos de depósitos de origem xistosa apresentam maior enriquecimento em terra fina e limo.

Todas as classificações do terreno se revelaram pouco eficientes a diferenciar os solos quanto às suas variáveis granulométricas. Os resultados foram melhores na diferenciação das variáveis de espessura, em especial com PMX e PR, apresentando-se as classificações pela seguinte sequência qualitativa: UTobs > PEobs-L > PE100-L > PE1-L. As classificações por observação obtiveram melhores resultados, mas as classificações geomorfométricas baseadas em variáveis regionais (PEX-L) foram melhores que as baseadas em variáveis locais (UTx e UTx-L). No caso da espessura do solo a eliminação de UT < 100 m² melhorou sempre a resposta das classificações.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a colaboração dos Engs. Pedro Mogo e José Rosado e do pessoal do Departamento de Engenharia Rural da Universidade de Évora: Eng. João Roma, Dr^a. Beatriz Castor e Sr. Custódio Alves.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alexandre, C. Silva, J. R. & Ferreira, A. G. 2001. Comparação de dois métodos de determinação da textura do solo: sedimentometria por raios X vs. método da pipeta. *Revista de Ciências Agrárias*, Vol. **24** (3-4): 73-81.
- Beven, K. & Kirkby, M.J. 1979. A physically-based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Science Bulletin*, **24**: 1-10.
- Burrough, P. & McDonnell, R. 1998. *Principles of Geographical Information Systems*. Spatial Information Systems and Geostatistics. Oxford University Press. Oxford.
- 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.
- Environmental Systems Research Institute (ESRI). 1999. *ArcView Spatial Analyst Extension*. ESRI, Redlands, CA, USA.
- Eyton, J. 1991. Rate-of-change maps. *Cartography Geog. Inform. Systems*, **18**: 87-103.
- 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.
- Jenny, H. 1941. *Factors of Soil Formation*. Dover Publications, Inc. New York.
- Jenson, S.K. & Domingue, J.O. 1988. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. Vol. **54** (11): 1593-1600.
- McBratney, A., Santos, M. & Minasny, B.

2003. On digital mapping. *Geoderma*, **117**, 3-52.
- 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.
- Pennock, D.J. & Corre, M.D. 2001. Development and application of landform segmentation procedures. *Soil & Tillage Research*, **58**: 151-162.
- Ricardo, R. Pinto. 1970. *Génese e Evolução dos Solos*. Apontamentos da disciplina de Pedologia e Conservação do Solo. Instituto Superior de Agronomia. Lisboa.
- Ruhe, R.V. 1975. *Geomorphology, Geomorphic Processes and Surficial Geology*. Houghton Mifflin, Boston, MA.
- Schmidt, J. & Hewitt, A. 2004. Fuzzy land element classification from DTMs based on geometry and terrain position. *Geoderma*, **121**: 243-256.
- SGP, 1974. Carta 37C. *Carta Geológica de Portugal* (Esc.1/50.000). Serviços Geológicos de Portugal. Lisboa.
- Shary, P. A., Sharaya, L. S. & Mitusov, A. V. 2002. Fundamental quantitative methods of land surface analysis. *Geoderma*, **107**, 1 –32.
- Webster, R. & Oliver, M. A. 1990. *Statistical Methods in Soil and Land Resource Survey*. Spatial Information Systems. Oxford University Press. Oxford.
- Wilding, L. & Drees, L. 1983. Spatial Variability and Pedology. In: Wilding L. et. al. (Eds.) *Pedogenesis and Soil Taxonomy: I. Concepts and Interactions*. Elsevier Publ. Co., Amsterdam, Netherlands, pp. 83-116.
- Wysocki, D. & Schoeneberger, P. 2000. Geomorphology of Soil Landscapes. In: Sumner, M. (Ed.). *Handbook of Soil Science*. CRC Press. Boca Raton, pp. E5-E39.