

MODELAÇÃO E VALIDAÇÃO DA SUSCEPTIBILIDADE A MOVIMENTOS DE VERTENTE NO MUNICÍPIO DE TAROUCA

Bruno MENESES¹, José Luís ZÊZERE²

¹ *Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa*

Email: santana.meneses@gmail.com

² *Centro de Estudos Geográficos, Instituto de Geografia e Ordenamento do Território Universidade de Lisboa*

Email: zezere@campus.ul.pt

PALAVRAS CHAVE

Movimentos de vertente, Avaliação da susceptibilidade, Valor Informativo, Taxas de sucesso e predição, Tarouca.

RESUMO

A determinação de áreas susceptíveis a movimentos de vertente no Município de Tarouca constitui um imperativo, devido aos prejuízos que estes têm causado, nomeadamente na perda/interrupção de infra-estruturas estratégicas (estradas principais). Face a esta premissa, recorreu-se aos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) para a construção de uma base de dados, que contempla a informação de um conjunto de variáveis físicas do território e os mapas temáticos com os diferentes tipos de movimentos inventariados. Para a avaliação da susceptibilidade, recorreu-se ao Valor Informativo, e os resultados obtidos são validados a partir de taxas de sucesso e de predição. Conclui-se que os modelos preditivos perdem consistência quando se produz a partição aleatória dos movimentos, pelo que é preferível a modelação com a totalidade dos casos de cada tipo específico de movimento, apesar da menor robustez que caracteriza as taxas de sucesso por comparação com as taxas de predição.

KEYWORDS

Landslides, Susceptibility assessment, Information Value, Success and prediction rates, Tarouca.

ABSTRACT

Landslides have been responsible for strong road disruption in the Tarouca municipality, and this is the reason to assess landslide susceptibility in this territory. Given this premise, we used the Geographic Information Systems (GIS), to build a database that includes thematic layers representing landslide predisposing factors, as well as, the landslide inventory built for the study area accounting the landslide typology. The Information Value Method was used to evaluate landslide susceptibility for each landslide type, and the performance of susceptibility models was measured using success and prediction rates and computing the Area Under Curve (AUC). We conclude that predictive models are less consistent when they are based in a small number of landslide cases. In such cases, the landslide partition should not be made, although the validation is less robust using the success rate of the model.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com Varnes (1984) e Zêzere *et al.* (2009), os futuros movimentos de vertente têm maior probabilidade de ocorrer sob condições geológicas e geomorfológicas semelhantes às que geraram instabilidade no presente e no passado. Neste contexto, a determinação das áreas onde a probabilidade de ocorrência de movimentos de vertente é maior é fundamental para a adopção de medidas preventivas no território.

Nas últimas décadas surgiram diversos métodos para avaliar a susceptibilidade à ocorrência destes movimentos, de entre os quais se destacam os métodos de cartografia indirecta de base estatística (Guzzetti *et al.*, 1999; Zêzere *et al.*, 2009). Estes sustentam-se na correlação espacial entre os factores de predisposição (geologia, declive, exposição, curvatura das vertentes, cobertura vegetal, uso do solo, entre outros) com as áreas onde ocorreram movimentos (variável dependente). Neste métodos de predição, inclui-se o método estatístico bi-variado do Valor Informativo (VI), proposto por Yin e Yan (1988), utilizado neste trabalho para determinar as áreas mais susceptíveis à ocorrência de movimentos de vertente.

2. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo é o Município de Tarouca, situado no distrito de Viseu. Este apresenta uma área de 100,1 Km², com altitudes compreendidas entre 400 e 1100 m (Fig. 1), destacando-se dois sectores distintos: um que compreende todo o vale do Varosa (altitudes variando entre 400 e 700m), com uma rede hidrográfica muito entalhada e vertentes de forte declive no seu sector jusante; outro situado a SW, uma área mais plana, com altitudes compreendidas entre 700 e 1100m. Esta área aplanada, também designada de superfície fundamental (Sole, 1952; citado por Ferreira e Sousa, 1994), é

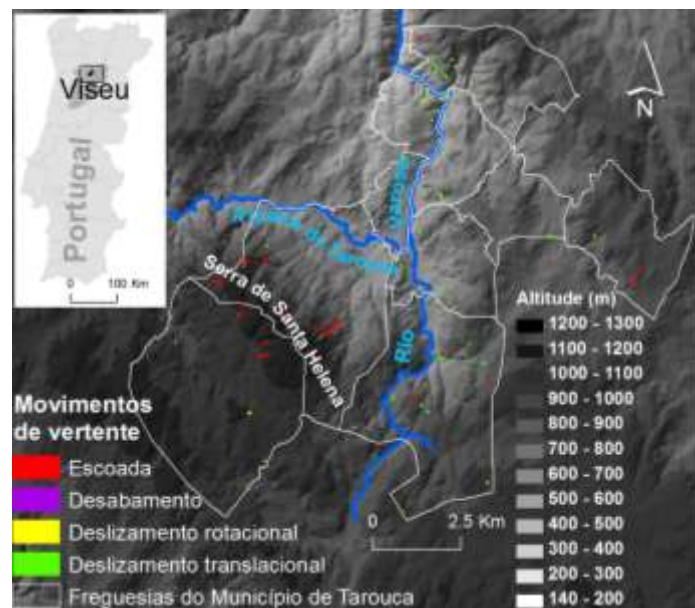


Fig. 1. Localização, altitude e distribuição dos movimentos de vertente no Município de Tarouca.

essencialmente xistenta (facto que favoreceu o desenvolvimento de uma rede hidrográfica densa) com cabeços arredondados, alguns deles dissecados pela rede fluvial. A litologia dominante no Município é, essencialmente, de composição granítica (granitos orogénicos biotíticos e de duas micas), cortada por diversos filões, que ocupam parcialmente a rede de falhas existente.

O clima desta região é classificado por Daveau *et al.* (1985) como continental, acentuado pela posição topográfica, com verões moderados e invernos frios. A precipitação média anual em Tarouca é de 1034mm, ocorrendo 40 % da chuva nos meses de Outono e 32% nos meses de Inverno.

Grande parte do território é utilizado para a prática agrícola, com predominância de culturas de regadio nas áreas aluviais, e de oliveiras e vinhas nas vertentes mais a N, muitos deles localizados sobre socos, estruturas predominantes nesta área. As áreas florestais têm forte expressão,

embora se assista à degradação do coberto vegetal devido aos vários incêndios ocorridos nos últimos anos e, também, à desflorestação, factores que favorecem a instabilidade geomorfológica.

3. RECOLHA DE DADOS

A inventariação dos movimentos de vertente iniciou-se através da análise e interpretação de ortofotomapas digitais obtidos em 2005 e 2008. Estes ortofotomapas têm elevada resolução (0,5 m), permitindo a visualização das formas de instabilidade, bem como diferentes texturas, alterações na vegetação, interrupções de culturas em áreas agrícolas, entre outros elementos, resultantes dos movimentos de vertente. Os possíveis movimentos de vertente foram confrontados com a altimetria (equidistância de 5m), sendo alguns deles eliminados devido ao contexto topográfico. A altimetria permitiu ainda a identificação de alguns deslizamentos adicionais, pela mudança repentina na disposição das curvas de nível, ou seja, inflexão para montante nos locais de depleção e inflexão para jusante nos locais de acumulação do material deslizado. Também se recorreu ao *Google Earth* para a identificação de movimentos de vertente. Esta é uma boa fonte de informação, pois tem na sua base de dados fotografias aéreas de diferentes datas, permitindo a comparação de uma mesma área em distintos períodos temporais. Posteriormente, todos os movimentos identificados foram alvo de validação *in loco*. O trabalho de campo permitiu a descrição das características dos movimentos de vertente identificados por foto-interpretação, assim como a identificação de um novo conjunto de movimentos de menores dimensões. No total obtiveram-se 128 movimentos validados, correspondendo a 50.002 m² de área instabilizada (Quadro 1).

Quadro 1. Movimentos de vertente identificados no município de Tarouca com diferentes técnicas de inventariação.

Bases da identificação	Tipologia dos movimentos de vertente				Área instabilizada (m ²)	% da área total
	Deslizamentos			Desabamentos		
	Rotac.	Transl	Escoadas			
Ortofotomapas	2	18	26	0	32525,7	0,03250
<i>Google Earth</i>	0	1	0	0	613,4	0,00061
Altimetria	0	2	0	0	69,2	0,00007
Trabalho de campo	8	68	2	0	16794,1	0,01678
TOTAL	10	89	28	1	5002,4	0,04996

4. MODELAÇÃO DA SUSCEPTIBILIDADE A MOVIMENTOS DE VERTENTE

Para a avaliação da susceptibilidade recorreu-se ao método estatístico bi-variado do Valor Informativo (VI), aplicado aos deslizamentos rotacionais, deslizamentos translacionais e escoadas. Não foi considerada a única ocorrência de desabamento presente no inventário. Para a utilização desta técnica, calcularam-se, numa primeira fase do procedimento analítico, as probabilidades *a priori* e as probabilidades condicionadas de cada variável independente, a partir das seguintes equações:

$$Pp = \frac{S}{N} \qquad PC_{ji} = \frac{S_i}{N_i}$$

onde: Pp é a probabilidade *a priori* de ocorrência de movimentos de vertente de tipo j ; S é o número total de unidades de terreno matriciais com movimentos de vertente; N é número total de unidades de terreno matriciais da área de estudo; PC_{ji} é a probabilidade condicionada na classe i do mapa temático J ; S_i é o número de unidades de terreno matriciais com movimentos de vertente de tipo j na variável J_i ; e N_i é o número de unidades de terreno matriciais com a variável J_i . Segundo Zêzere *et al.* (2009), as probabilidades condicionadas dão a indicação objectiva e

quantificada da importância relativa de cada variável na distribuição dos movimentos de vertente. Estas probabilidades foram calculadas separadamente para os três tipos de movimentos de vertente considerados: deslizamentos rotacionais, deslizamentos translacionais e escoadas, e considerando a totalidade das áreas afectadas. Deste modo, obtiveram-se os VI expresso no Quadro 2, recorrendo à seguinte equação:

$$I_j = Ln \frac{PC_{ji}}{P_p}$$

onde: I_j é o Valor Informativo da classe i do mapa temático J .

Quadro 2. Valores Informativos obtidos para as classes dos factores de predisposição para os três tipos de movimentos de vertente considerados. Os valores a negrito foram atribuídos manualmente, considerando-se o decimal mais baixo por comparação ao VI mínimo obtido na variável.

Variáveis	Classes e respectivo ID atribuído na reclassificação	Área de cada classe (m2)	Probabilidade condicionada (PC _{ji})			Valor Informativo (VI)		
			D. Rotac.	D. Transl.	Escoada	D. Rotac.	D. Transl.	Escoada
Declive	0-5°=1	19785000	0.000066	0.000192	0.000066	1.0948	0.0490	-1.3825
	5-10°=2	32024100	0.000006	0.000047	0.000203	-1.2585	-1.3621	-0.2546
	10-15°=3	22884900	0.000004	0.000131	0.000275	-1.6157	-0.3329	0.0502
	15-20°=4	14632500	0.000027	0.000314	0.000513	0.2178	0.5417	0.6717
	20-25°=5	7387300	0.000027	0.000528	0.000379	0.2082	1.0602	0.3699
	25-30°=6	2630600	0.000000	0.000456	0.000266	-1.7000	0.9140	0.0162
	>30°=7	722400	0.000000	0.000415	0.001523	-1.7000	0.8201	1.7606
Exposição	PLANO=0	103	0.000000	0.000000	0.000000	-0.5000	-0.6000	-3.0000
	NW=1	10310600	0.000078	0.000107	0.000087	1.2611	-0.5389	-1.0985
	W=2	12789200	0.000055	0.000305	0.000399	0.9121	0.5113	0.4207
	SW=3	13667900	0.000022	0.000132	0.000527	-0.0016	-0.3283	0.6991
	S=4	9874200	0.000020	0.000111	0.000071	-0.0820	-0.4957	-1.3065
	SE=5	9514300	0.000000	0.000462	0.000336	-0.5000	0.9277	0.2504
	E=6	12074600	0.000000	0.000116	0.000290	-0.5000	-0.4557	0.1017
	NE=7	17093700	0.000000	0.000129	0.000316	-0.5000	-0.3513	0.1878
	N=8	14742200	0.000014	0.000163	0.000014	-0.4828	-0.1163	-2.9601
Curva - tura	Convexo =1	41521200	0.000024	0.000236	0.000414	0.0912	0.2551	0.4588
	Rectilíneo =2	13003200	0.000008	0.000154	0.000169	-1.0504	-0.1731	-0.4367
	Côncavo =3	45542400	0.000024	0.000143	0.000149	0.0940	-0.2479	-0.5616
Geologia	Filão =1	856700	0.000000	0.000233	0.000117	-1.0000	0.2442	-0.8078
	Granito g. fino =2	11038600	0.000000	0.000217	0.000226	-1.0000	0.1730	-0.1450
	Granito g. méd. =3	61522300	0.000008	0.000232	0.000362	-0.9951	0.2398	0.3253
	Filitos =4	5455600	0.000037	0.000092	0.000000	0.5114	-0.6909	-2.1000
	Aluviões =5	1605100	0.000125	0.000062	0.000000	1.7348	-1.0768	-2.1000
	Xisto =6	17677700	0.000074	0.000045	0.000034	1.2075	-1.3965	-2.0430
	Conglomerados =7	110000	0.000000	0.000000	0.000000	-1.0000	-1.4000	-2.1000
	Depósitos vert. =8	137200	0.000000	0.000000	0.000000	-1.0000	-1.4000	-2.1000
	Granito g. gross. =9	1401300	0.000000	0.000000	0.000000	-1.0000	-1.4000	-2.1000
	Quartzitos =10	268300	0.000000	0.000000	0.002609	-1.0000	-1.4000	2.2991
NDVI	0 - 0.25 =1	169500	0.000000	0.000000	0.000000	-0.1000	-2.1000	-0.8000
	0.25 - 0.5 =2	22965800	0.000357	0.000165	0.000065	0.3103	-0.0999	1.0890
	0.5 - 0.75 =3	68485100	0.000261	0.000209	0.000010	-0.0016	0.1327	-0.7658
	0.75 - 1 =4	8460000	0.000012	0.000024	0.000000	-0.1000	-2.0457	-0.8000
Uso do solo	Agrícola =1	20693500	0.000010	0.000174	0.000034	-0.8217	-0.0498	-2.0463
	Urbano =2	2587800	0.000000	0.000039	0.000000	-0.9000	-1.5543	-2.1000
	Agric. e florestal =3	17749100	0.000017	0.000062	0.000152	-0.2628	-1.0820	-0.5429
	Florestal =4	58773100	0.000029	0.000230	0.000388	0.2745	0.2281	0.3933
	Inculto =5	276900	0.000000	0.000000	0.000000	-0.9000	-1.6000	-2.1000
Solo	Isg =1	62500	0.000000	0.000000	0.000000	0.5841	-0.5000	-0.6000
	Idox1=2	2711100	0.000000	0.000000	0.000000	0.5841	-0.5000	-0.6000
	Tatdg =3	22830400	0.000039	0.000307	0.000175	0.5841	0.5169	-0.4016
	Idog =4	19350700	0.000000	0.000279	0.000315	0.5841	0.4227	0.1858
	Idox =5	1247000	0.000000	0.000000	0.000000	0.5841	-0.5000	-0.6000
	Iug =6	21436700	0.000000	0.000117	0.000616	0.5841	-0.4497	0.8553
	Tatdx =7	251400	0.000000	0.000000	0.000000	0.5841	-0.5000	-0.6000
	Bdog =8	11159200	0.000000	0.000224	0.000000	0.5841	0.2031	-0.6000
	Jdoa =9	1483500	0.000000	0.000000	0.000000	0.5841	-0.5000	-0.6000
	Iux =10	13248300	0.000098	0.000000	0.000166	1.4960	-0.5000	-0.4552
	Urb =11	689800	0.000000	0.000000	0.000000	0.5841	-0.5000	-0.6000
	Buox =12	4866800	0.000000	0.000000	0.000144	0.5841	-0.5000	-0.5989
	Buog =13	742800	0.000000	0.001212	0.000000	0.5841	1.8910	-0.6000

O VI de cada unidade de terreno matricial num modelo de susceptibilidade resulta do somatório

simples dos valores informativos das classes de variável presentes nesse pixel.

Na avaliação da susceptibilidade foram aplicados dois métodos de validação, recorrendo a taxas de sucesso e a taxas de predição. No primeiro método os resultados são validados com todos os movimentos que lhe deram origem, enquanto no segundo, há a partição da variável dependente de forma aleatória, servindo uma parte para fazer a modelação e a outra para validar os resultados obtidos. Para cada modelo construíram-se as respectivas curvas de sucesso e de predição, de forma a comparar visualmente os resultados obtidos. A Área Abaixo da Curva (AAC) foi determinada para quantificar as diferenças existentes entre os modelos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com os resultados dos VI obtidos nos dois métodos de validação, elaboraram-se os respectivos mapas de susceptibilidade, sendo estes classificados em quatro classes de susceptibilidade, definidas a partir dos scores do VI (>1 elevada, 0 a 1 moderada, -1 a 0 reduzida e <-1 muito reduzida). Pela comparação visual entre os mapas obtidos (Fig. 2) observam-se certas diferenças entre os dois métodos, nomeadamente a redução da área classificada como mais susceptível na validação por taxas de predição e, em paralelo, o aumento da área das classes de susceptibilidade inferiores.

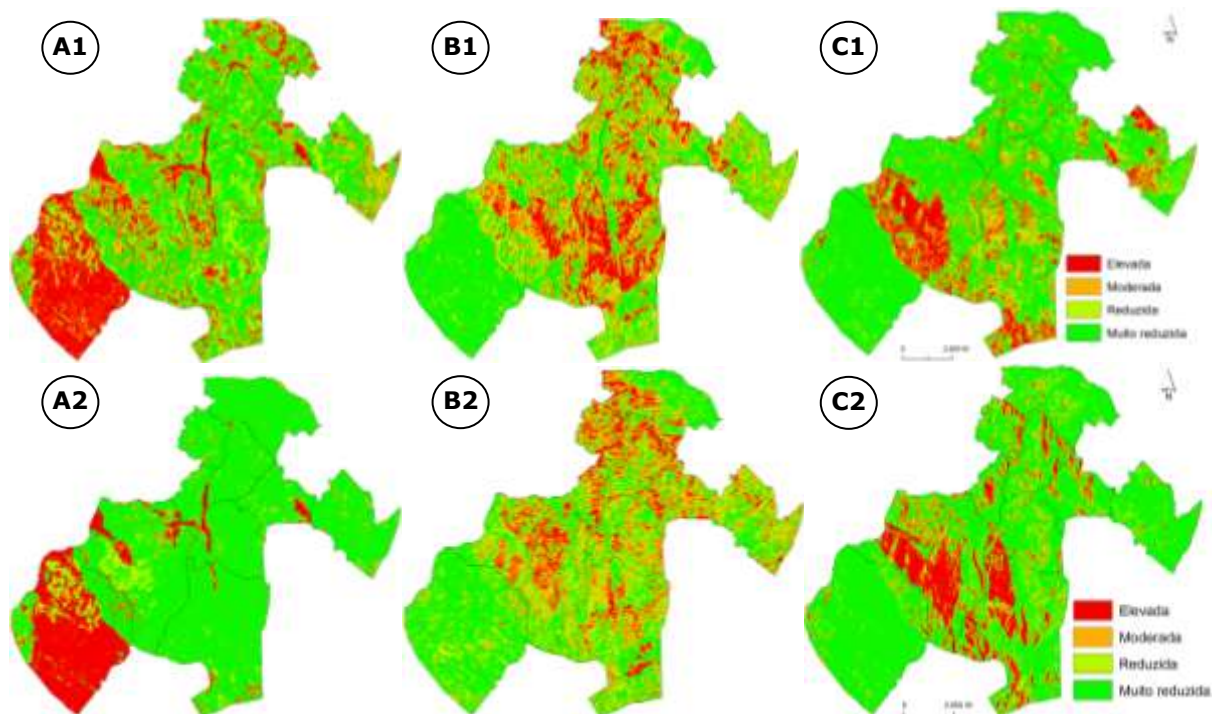


Fig. 2. Mapas de susceptibilidade a movimentos de vertentes. A – deslizamentos rotacionais; B – deslizamentos translacionais; C – escoadas. Os valores correspondem a mapas validados por taxas de sucesso (1) e por taxas de predição (2), baseadas na partição aleatória dos movimentos de vertente.

As diferenças são ainda mais significativas nas curvas de sucesso e de predição obtidas para cada tipo de movimento (Fig. 2), sendo notória a fraca qualidade das taxas de predição. Estes resultados são corroborados pela diferença quantificada das AAC (Quadro 3) onde se verifica a maior eficiência das taxas de sucesso, face às taxas de predição. Estes resultados são interpretados como resultando da reduzida quantidade de movimentos inventariados que integraram a modelação. Com efeito, a amostra de manifestações de instabilidade é diminuta e a

modelação perde consistência quando se reduz o grupo de movimentos de modelação a metade.

Quadro 3. Área Abaixo da Curva (AAC) dos modelos preditivos.

	Deslizamentos rotacionais	Deslizamentos translacionais	Escodas
Taxas de sucesso	0.877	0.794	0.842
Taxas de predição	0.358	0.502	0.560

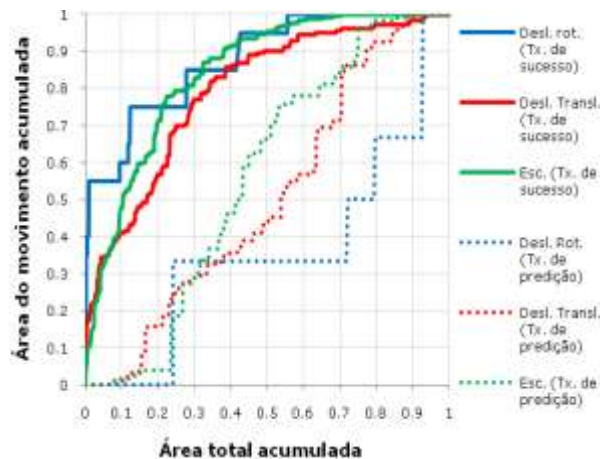


Fig. 3. Curvas de sucesso e de predição dos modelos preditivos.

6. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos na avaliação da susceptibilidade para a área de estudo demonstram grande variação espacial por cada tipo de movimento de vertente, em função de condicionalismos distintos por parte dos factores de predisposição. Nas áreas xistentas há forte probabilidade de ocorrerem deslizamentos rotacionais, enquanto os deslizamentos translacionais ocorrem com mais frequência nas vertentes do Vale do Varosa. A Serra de Santa Helena destaca-se pela susceptibilidade elevada à ocorrência de escodas, verificando-se nestas áreas, vertentes com declive forte e coberto vegetal degradado.

Face ao reduzido número de movimentos de vertente que constituem o inventário de movimentos de vertente construído para o município, verifica-se que os modelos preditivos perdem consistência quando se produz a partição aleatória dos movimentos, pelo que é preferível a modelação com a totalidade dos casos de cada tipo específico de movimento, apesar da menor robustez que caracteriza as taxas de sucesso por comparação com as taxas de predição.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Daveau S e Colaboradores (1985) *Mapas Climáticos de Portugal. Nevoeiro e Nebulosidade. Contrastes Térmicos*. Centro de Estudos Geográficos, Memória N.º 7, Lisboa.
- Ferreira N, Sousa M (1994) *Noticia Explicativa da Folha 14-B – Moimenta da Beira*. Instituto Geológico e Mineiro, Lisboa.
- Guzzetti F, Carrara A, Cardinali M, Reichenbach P (1999) Landslide Hazard Evaluation: a Review of Current Techniques and Their Application in a Multi-Scale Study, Central Italy. In: *Geomorphology*, 31: 181-216.
- Varnes D (1984) *Landslide Hazard Zonation: a Review of Principles and Practice*. UNESCO, Paris.
- Yin K, Yan T (1988) Statistical Prediction Model for Slope Instability of Metamorphosed Rocks. In: Bonnard C (ed.), *Proc. Fifth International Symposium in Landslides*, Lausanne. A.A. Balkema, Rotterdam, Holanda, 2: 1269-1272.
- Zêzere J, Faleh A, Sadiki A, Garcia R, Oliveira S (2009) Modelação da Susceptibilidade a Deslizamentos na Bacia do Oued Sra (Rif central, Marrocos) com Métodos Estatísticos Bi-variados. In: *Publicações da Associação Portuguesa de Geomorfólogos*, 5, APGEOM, Braga: 203-210.