

Avaliação da suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos no centro sul da ilha da Madeira com a aplicação dos métodos do Valor Informativo e Probabilidade Bayesiana

JORGE URBANO ANTUNES LOPES PEREIRA - Nº 4687¹
ALEXANDRE MIGUEL LOPES BIRRA - Nº 4874

Resumo - A variabilidade climática acentua a ocorrência de desastres naturais, com impacto no território e na vida das pessoas. A identificação e mapeamento das áreas mais sensíveis ao desencadeamento deste tipo de fenómenos assume uma grande importância para a implementação de políticas e estratégias aplicadas ao ordenamento do território, proporcionado melhores condições de segurança e mitigação de riscos. O objetivo deste estudo, desenvolvido numa área centro-sul da ilha da Madeira, consiste na aplicação de uma metodologia para a avaliação quantitativa da suscetibilidade à ocorrência de fenómenos perigosos, mais precisamente do movimento de vertentes, em particular dos deslizamentos. O modelo é baseado na aplicação de métodos estatísticos bivariados tais como o Valor Informativo e a Probabilidade Bayesiana, que usam algoritmos que assentam na análise estatística e probabilística da relação entre os deslizamentos e os fatores que os condicionam, como o declive, o tipo de solos, a geologia e o uso e ocupação do solo. Para validar o modelo, recorre-se, por um lado, a um SIG com a criação de uma partição espacial aleatória, criando dois grupos de deslizamentos – um de modelação e outro de validação. Por outro lado, com um software, calcula-se uma regressão logística para obter área sob a curva e uma validação imediata com matriz de classificação e o coeficiente de colinearidade. Por fim, conclui-se que os mapas de maior ou menor probabilidade de ocorrência de deslizamentos são instrumentos ideais de apoio à decisão no ordenamento do território e na mitigação de riscos.

Palavras-chave: Deslizamentos; Movimento de Vertentes; Probabilidades Espaciais; Valor Informativo; Probabilidade Bayesiana

Introdução

Entre os vários perigos naturais, os movimentos de massa em vertente têm vindo a despertar interesse crescente na comunidade científica, nomeadamente no âmbito da Geomorfologia, Geologia, Engenharia e Geotecnia (Piedade, 2009). São definidos como movimentos de descida de uma massa constituída por rocha ou solo, em que essa massa afetada progride para jusante e para o exterior (Julião *et al.*, 2009). Apesar de lhe ser atribuído um potencial destrutivo médio e a sua abrangência não atingir a escala global (Garcia, 2012), as consequências podem ser bastante nefastas, tanto a nível humano como económico.

Este estudo tem por objetivo a criação de um modelo de avaliação de suscetibilidade à ocorrência de fenómenos perigosos, no caso do movimento de vertentes, em particular dos deslizamentos.

¹ Alunos do IGOT no âmbito da UC, AEAR, Lisboa, Portugal.

Desenvolve-se a aplicação de dois métodos estatísticos bivariados: o Valor Informativo e a Probabilidade Bayesiana.

Para o desenvolvimento do trabalho, recorreu-se à utilização de cartografia digital e modelação em Sistemas de Informação Geográfica (SIG), culminando com a aplicação de uma metodologia de avaliação da suscetibilidade associado à ocorrência de deslizamentos e a criação de mapas indicativos de suscetibilidades de ocorrência de deslizamentos, comparando os dois métodos utilizados.

O modelo de suscetibilidade é baseado em algoritmos que assentam na análise estatística/probabilística, mais concretamente na comparação entre as unidades de terreno correspondentes a deslizamentos conhecidos e as correspondentes às características das vertentes.

Por fim a validação dos resultados obtidos, por um lado, através da matriz de classificação, permite uma validação imediata do índice de colinearidade – tolerância (TOL) e o factor *variance inflation factor* (VIF), ou seja, o ajustamento do modelo através de regressão logística é sensível à colinearidade entre as variáveis independentes (Hosmer e Lemeshow 1989). Por outro, é realizada uma partição dos dados de modo aleatório ao conjunto dos movimentos de vertente ocorridos na área de estudo em dois grupos, o de modelação e o de validação.

Localização e enquadramento da área de estudo

A área de estudo circunscreve-se a três municípios da zona centro sul da ilha da Madeira no Arquipélago da Madeira. São eles **Ponta do Sol, Ribeira Brava e Câmara de Lobos**, com uma área de cerca de 18602 hectares (ha), ou seja 186 km². Contempla ainda uma área relativa a uma faixa com a largura de 500m para além dos limites administrativos.

O Arquipélago da Madeira situa-se no Atlântico Norte, aproximadamente a 900 km a SW de Portugal Continental e a 700 km a W da costa magrebina, com coordenadas entre os paralelos 30° 01' e 33° 08', de latitude Norte e os meridianos 15° 51' e 17° 16' de longitude Oeste de Greenwich.

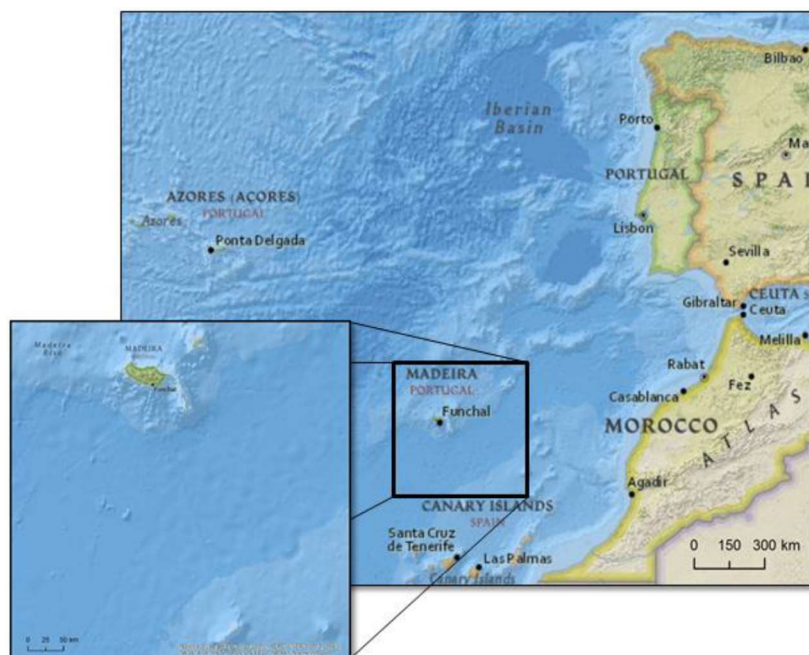


Figura 1A - Localização do Arquipélago da Madeira.

Fonte: Basemap do ArcGIS

A ilha da Madeira cobre cerca de 92,5% da área total do arquipélago (758,54 km²), com extensão cerca de 58 km da Ponta de Pargo até à Ponta de São Lourenço, segundo a direção E-W e largura de 23 km entre o Arco de São Jorge e a Ponta da Cruz, localizado a oeste do Funchal, segundo a direção N-S.

A área de estudo é constituída por bacias hidrográficas localizadas na parte central e sul da ilha. Estas bacias são formadas pelas ribeiras da Ponta do Sol, Ribeira Brava, Ribeira do Vigário e dos Socorridos, que constituem uma rede de drenagem que diverge dos picos centrais para as extremidades na linha de costa.

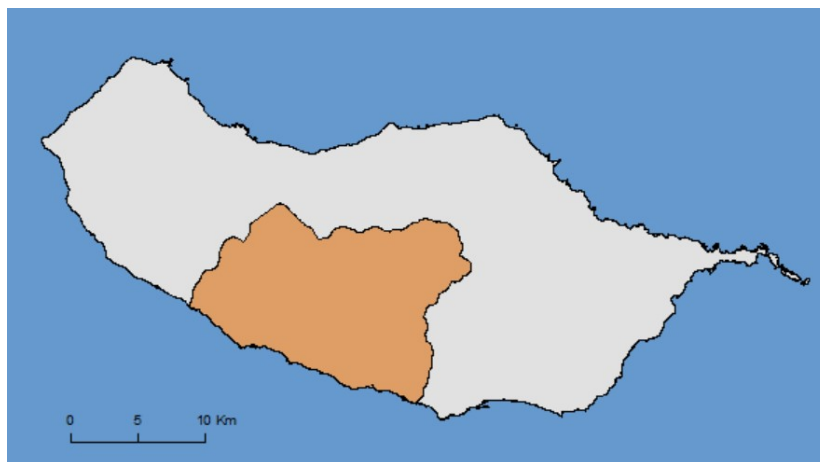


Figura 1B – Área de Estudo.

Quanto aos dados geomorfológicos, a área de estudo localiza-se no Maciço Central que corresponde aos grandes aparelhos vulcânicos, revelando um elevado índice de erosão, sendo a sua orografia o resultado das nítidas diferenças de resistência dos materiais litológicos. Onde o seu relevo é mais vigoroso, atinge os 1862m no Pico Ruivo, o ponto mais alto do arquipélago. A altitude média da ilha é 700 m.

Os vales configuram-se, na sua grande maioria, profundos, estreitos e apresentam perfis transversais em forma de “v”, característicos de maciços rochosos. Existem ainda vales com a configuração em “v” aberto, sendo estes característicos de maciços terrosos (Simões, 2015)

Para além dos referidos aparelhos vulcânicos, identificaram-se Depósitos Sedimentares Recentes, compostos por: aluviões, cascalheiras e areias de praia, depósitos de vertentes e coluviões (dv), depósitos de movimentos de massa, depósitos de areias eólicas, depósitos glaciares e periglaciares e depósitos de *lahar*.

Relativamente à litologia, são as rochas ígneas ou primárias que afloram na área, pois estão diretamente associadas ao vulcanismo que deu origem à própria ilha. As rochas sedimentares são na sua grande maioria associadas à erosão das anteriormente mencionadas.

O clima na Madeira é influenciado pela sua localização atlântica, e é condicionado principalmente pela intensidade e localização do anticiclone subtropical dos Açores. A forma e a orientação do relevo têm um papel fundamental, pois as montanhas funcionam como barreiras que separam o Norte do Sul e conferem-lhe características distintas, tanto a nível climático como à exposição dos agentes erosivos, resultando numa variabilidade na distribuição de precipitação e de temperatura (Simões, 2015).

Este fenómeno, conhecido por Anticiclone dos Açores, explica a forte concentração das chuvas no Inverno e a escassez das mesmas na época mais quente (Almeida, 2013). Na estação mais fria, verificam-se os valores de precipitação mais elevados, podendo ocorrer chuvas muito abundantes no Outono, Inverno e Primavera.

O Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA) atribui à Madeira, segundo a classificação de Köppen como Csa, clima temperado com verão quente e seco. A temperatura média anual do ar tem uma variação espacial entre 9°C e 19°C, verificando-se os valores mais elevados na vertente sul. As temperaturas absolutas inferiores a 0°C são raras e ocorrem nas áreas mais elevadas (IPMA).

Ter em conta a precipitação é importante, porque esta pode constituir um fator de desencadeamento dos deslizamentos. A precipitação anual varia entre 600 a 800 mm na costa Sul e 1500 a 2000 mm na costa Norte, ultrapassando os 3000 mm em áreas mais elevadas. As chuvas são frequentemente intensas, sobretudo no Outono, e início da Primavera, e muitas vezes estão associadas a fortes ventos e tempestades marítimas (IPMA).

Os deslizamentos e os fatores condicionantes

O termo *landslide* ou movimentos de vertente é definido por Cruden (1991) como “movimento de descida gravítica numa vertente de uma massa de rocha, terra ou detritos” (WP/WLI, 1993).

Existem vários tipos de movimentos de vertente classificados por diversos autores. Para o nosso estudo focar-nos-emos nos deslizamentos (*slide*). Assim, temos como deslizamentos: o movimento numa vertente ou talude de solo ou rocha ao longo de uma superfície de rutura, com efeitos de intensa deformação tangencial.



Figura 2 - Tipologia dos Movimentos de Vertente: Deslizamentos
Fonte: UNESCO WP/WLI (1993).

Os deslizamentos dividem-se em translacionais e rotacionais, de acordo com a forma da superfície do deslizamento, respetivamente planar ou côncava. No entanto, neste estudo, não se tem em conta esta diferença.

Os deslizamentos translacionais ocorrem ao longo de superfícies de rutura planares ou com uma ligeira ondulação. Assim, a massa deslocada é com frequência evacuada para além da superfície de rutura do movimento. O plano de deslizamento desenvolve-se ao longo da superfície de fraqueza, marcada por uma reduzida resistência ao corte, tais como falhas, planos de estratificação, diáclases ou o contacto entre uma cobertura detrítica e o substrato rochoso (Varnes, 1978).

Os deslizamentos rotacionais ocorrem ao longo de superfícies de rutura curvas, com forma côncava, e afetam geralmente terrenos homogêneos e isotrópicos. A topografia é característica: o movimento apresenta uma rotação que se materializa por um abatimento a montante e, conseqüentemente, por um levantamento do seu sector frontal, formando frequentemente declives pronunciados (Hutchinson, 1988).

As condições que desencadeiam os deslizamentos, que se aplicam neste estudo, são as de causas naturais. A saturação de água no solo em vertentes declivosas é a principal causa. O tipo de solo

e o seu revestimento e a estrutura geomorfológica são também fatores com impacto neste fenómeno.

Os fatores condicionantes para a avaliação e predição de suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos são: *declive, solos, geologia e uso do solo*. Estes 4 fatores são as variáveis independentes a incluir no modelo de análise. Como refere Garcia (2012), “*a qualidade das bases cartográficas dos parâmetros que permitem avaliar a predisposição à ocorrência de movimentos de vertente reveste-se de uma importância fundamental*”. Isto demonstra a importância desta escolha.

Para além este aspeto, um outro é igualmente importante que é a classificação dos dados, relativamente ao qual Garcia (2012) indica que “*se é verdade que uma simplificação excessiva dos dados retira capacidade aos modelos, também não deixa de ser real que um número ilimitado de classes (ou mesmo a sua ausência considerando variáveis contínuas) não garante melhores resultados*”.

Esta classificação é mais importante nas variáveis espaciais que apresentem valores contínuos (e.g. declive). No entanto, as variáveis categóricas (e.g. ocupação do solo, geologia e tipos de solos) também necessitam por vezes de uma reclassificação, permitindo assim homogeneizar a informação.

Metodologia e estruturação dos dados

Os dados espaciais

Os dados espaciais para a criação do modelo têm uma estrutura vetorial e matricial como é apresentado no quadro abaixo, onde está sistematizada a informação utilizada, bem como as fontes de informação e respetivas escalas.

Os diversos temas cartográficos podem ser divididos em dois grupos: o que representa a distribuição dos deslizamentos na área de estudo, que constitui, assim, a variável dependente no modelo; e os que representam as variáveis independentes, com algum tipo de influência na ocorrência dos deslizamentos (Reis et al. 2003).

Para os dados geográficos referentes às variáveis independentes (*declive, solos, geologia e uso do solo*), houve a necessidade de os reclassificar e converter para estrutura *raster* de forma a permitir modelar e calcular relações espaciais entre eles e a distribuição dos movimentos de vertente. A resolução utilizada é 5x5 metros (células com 25 m²), pois é uma dimensão que se adequa à escala e às características da informação altimétrica do MNE e à informação utilizada nas variáveis dependentes (movimentos de vertente, deslizamentos).

Os dados foram transformados para o sistema de referência mais recente, o ITRF93/ PTR08 - UTM zona 28N - Madeira, Porto Santo, Desertas e Selvagens, com o código: EPSG:5016.

Quadro 1 - Características da informação geográfica, os dados espaciais

Variável	Tipo de informação	Fonte da informação	Sistema de coordenadas	Resolução / Escala
Declive	MNE – Modelo Numérico de Elevação	DROTe / DRCC (Direção Regional de Cartografia e Cadastro da Madeira)	Porto_Santo_1936 UTM_Zone_28N	1:10000 (cell size 5x5)
Uso do solo (COS)	Polígonos de ocupação do solo	DGT / NaturalGIS Carta de Ocupação do Solo de 2007 da Região Autónoma da Madeira	PTRA08 UTM_Zone_28N	1:25000
Geologia (litologia)	Polígonos de formações geológicas	SRARN, RAM Carta Geológica da Madeira	Porto_Santo_1936 UTM_Zone_28N	1:50000
Solos	Polígonos de Solos	SRARN, RAM Carta dos Solos da Madeira	Porto_Santo_1936 UTM_Zone_28N	1:50000
Deslizamentos	Polígonos	-	Porto_Santo_1995 UTM_Zone_28N	Área de 100 a 19 500 m ²

A variável dependente: os deslizamentos

Neste trabalho, o tema Deslizamentos é a variável dependente com 402 ocorrências numa área total de instabilidade de 220 669 m² ou seja 0,12% da superfície total da área de estudo (186 km²). A dimensão dos deslizamentos varia entre 100 e 19 500 m², e a respetiva densidade é de 2,2 eventos/km².

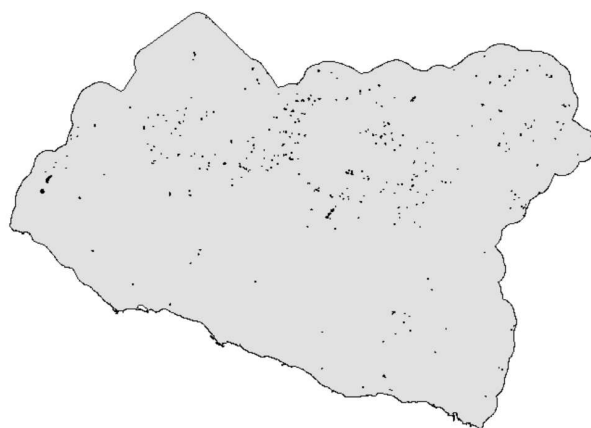


Figura 3 – Área de estudo com os deslizamentos

As variáveis independentes

As variáveis independentes *declive*, *solos*, *geologia* e *uso do solo* foram previamente convertidas da estrutura vetorial para estrutura matricial (raster) e posteriormente (re)classificadas para integrarem o modelo de suscetibilidade.

Declive

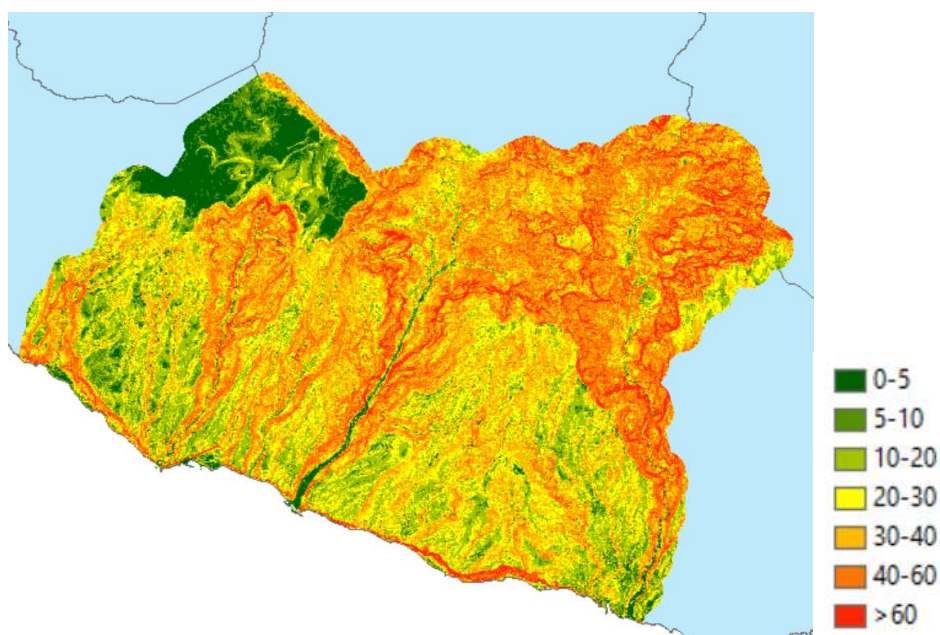


Figura 4 - Declive (graus) da área de estudo

A variável espacial declive resulta do Modelo Numérico de Elevação (MNE) através da ferramenta de análise 3D, o *slope*.

O mapa de declives (Figura 4) foi classificado com 7 classes em graus (0 – 5°; 5 – 10°; 10 – 20°; 20 – 30°; 30 – 40°; 40 – 60°; 60 - 86,708557°).

Os declives na área de estudo são bastante vigorosos, observando-se que a classe (30 – 40°), representa cerca de 25% da área de estudo e cerca de 73% da área encontra-se acima dos 20°. Por outro lado, os declives até 10° (0 – 5°; 5 – 10°) cobrem apenas 10,7% do território de estudo.

Quadro 2 - Frequência (ha e %) dos declives

CLASSES	AREA		COUNT	%
	(ha)	AREA (m2)		
0-5	972,5	9725425	389017	5,2
5-10	1017,1	10170625	406825	5,5
10-20	2927,9	29278675	1171147	15,8
20-30	3720,1	37200525	1488021	20,0
30-40	4736,5	47364550	1894582	25,5
40-60	4180,6	41805600	1672224	22,5
>60	1012,3	10122600	404904	5,5

Solos

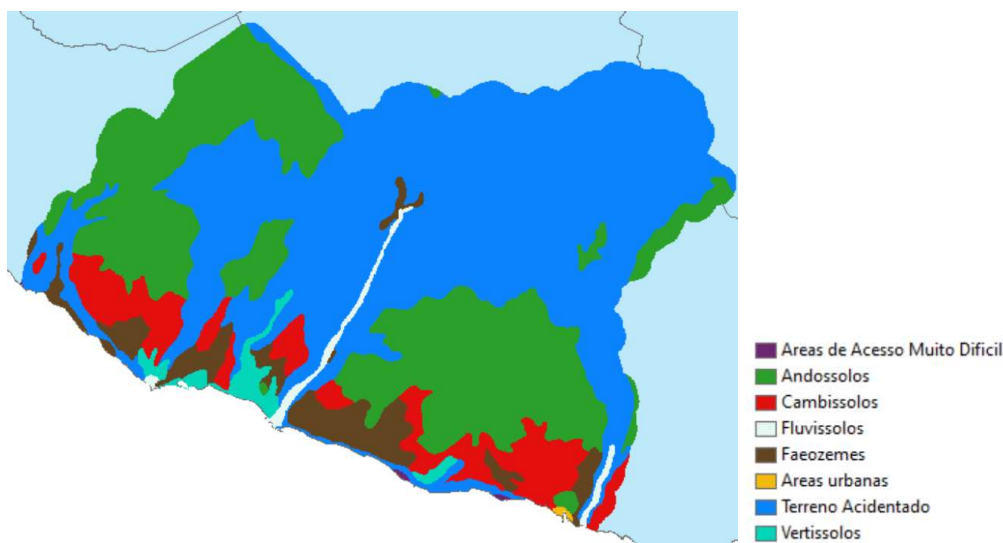


Figura 5 - Classes de tipo de solos

Na carta de Solos da Ilha da Madeira, existem 8 grupos principais de solos, que se subdividem em 15 unidades de solo. Nesta variável independente usamos 8 classes, de acordo com a tabela.

Na área de estudo estão presentes 5 tipos de solos: Fluvissoles, Andossolos, Vertissolos, Cambissolos e Faeozemes, e 3 tipos particulares de terreno: Áreas urbanas, Terreno Acidentado e Áreas de Acesso Muito Difícil.

Quadro 3 – classes dos tipos de solos

Grupo	Solos	Designação	Tipo de Solos
TA	Terreno Acidentado	TAd	Terreno Acidentado Dístico (a partir 200m)
		TAe	Terreno Acidentado Eútrico (até 600m)
VR	Vertissolos	VRe	Vertissolos eútricos
FL	Fluvissoles	FLe	Fluvissoles eútricos
		FLd	Fluvissoles dísticos
AN	Andossolos	ANu	Andossolos úmbricos
		ANz	Andossolos vítricos
CM	Cambissolos	CMe	Cambissolos eútricos
		CMu	Cambissolos húmicos
		CMx	Cambissolos crómicos
PH	Faeozemes	PHh	Faeozemes háplicos
	Áreas urbanas	Social ou AU	
	Áreas de Acesso Muito Difícil	AAMD	

Fonte: adaptado de Simões, (2015).

As características dos Solos da área de estudo, segundo a Carta de Solos da Ilha da Madeira (Castro, 2011), são:

- Andossolos (AN) compostos por 4 subunidades de solo, nomeadamente “Andossolos háplicos”, “Andossolos Mólicos”, “Andossolos Úmbricos” e “Andossolos Vítricos”. Os “Andossolos Úmbricos” e os “Andossolos Háplicos” têm origem predominantemente de rochas basálticas e são ricos em matéria orgânica. Os “Andossolos Vítricos” são compostos maioritariamente por materiais soltos de piroclastos grosseiros, apresentando uma reduzida capacidade de retenção de água.

- Cambissolos (CM), frequentemente derivados de rochas basálticas, com menos frequência formam-se a partir de tufo e raramente são formados por piroclastos grosseiros.
- Dividem-se em 5 subunidades de solo, nomeadamente “Cambissolos êutricos”, “Cambissolos distrícos”, “Cambissolos húmicos”, “Cambissolos crómicos” e “Cambissolos vertico”; separam-se ainda em 2 conjuntos, saturados e insaturados. Os “Cambissolos êutricos”, “Cambissolos crómicos” e “Cambissolos vertico” correspondem ao primeiro conjunto, ou seja, com grau de saturação base superior a 50%. Os restantes, “Cambissolos distrícos” e “Cambissolos húmicos”, correspondem aos insaturados.
- Faeozemes (PH) que derivam principalmente de rochas basálticas.
- Vertissolos (VR) que derivam apenas de rochas basálticas de natureza compacta.
- Fluviosolos (FL) que são constituídos por 2 subunidades de solo, “Fluviosolos êutricos” e “Fluviosolos distrícos”, e têm origem aluvionar, constituídos por depósitos não consolidados muito heterogêneos.
- Terreno acidentado (TA) que, segundo a Carta de Solos da Ilha da Madeira, engloba áreas predominantemente montanhosas e sem escarpas (as mais frequentes), áreas montanhosas com maior ou menor extensão de escarpas e também, embora menos frequentes, áreas exclusivamente escarpadas. São áreas muito declivosas (declive médio de 40°) e intensamente dissecadas pelas linhas de água profundamente encaixadas; exibem com frequência “degraus” (geralmente baixos nas zonas a que correspondem os declives menos acentuados), os quais aumentam de desenvolvimento passando a taludes bem marcados e dando lugar, por seu turno, a quebradas e escarpas imponentes, desde que o relevo tenha mudado para montanhoso e escarpado. Além disso, são áreas inacessíveis em que não foi possível o reconhecimento sistemático dos seus solos. O Terreno Acidentado divide-se em dois conjuntos: o Terreno Acidentado Êutrico, que se localiza essencialmente em altitudes inferiores a 600 m, sob um clima semiárido a húmido e engloba os grupos de solos Calcissolos, Cambissolos, Faeozemes e Vertissolos; o Terreno Acidentado Dístico, que se localiza de forma distribuída a altitudes superiores a 200 m, sob um clima húmido a super-húmido e engloba as unidades - solo Andossolos e Cambissolos
- Áreas Urbanas: a Carta dos Solos da ilha da Madeira não engloba o solo urbano, pelo que foi necessário recorrer à informação proveniente Carta de Ocupação do Solo para obter este tipo de unidade.

Quadro 4 - Frequência (ha e %) do tipo de solos

DESIG_SOLO	AREA (ha)	AREA (m2)	COUNT	%
Áreas de Acesso Muito Difícil	11	114300	4572	0,1
Andossolos	5689	56891450	2275658	30,6
Cambissolos	1513	15126200	605048	8,1
Fluviosolos	183	1830450	73218	1,0
Faeozemes	1022	10219400	408776	5,5
Áreas urbanas	12	117775	4711	0,1
Terreno Acidentado	9863	98627050	3945082	53,0
Vertissolos	309	3091300	123652	1,7

A classe “Terreno acidentado” (TA) é predominante na área de estudo, cobrindo uma área de 53,0%. Tem o declive médio mais elevado da área de estudo, cerca de 40° e situa-se na parte mais elevada e interior da área de estudo, onde o relevo é mais rigoroso. A classe “Áreas Urbanas” está cartografada apenas no limite sul com uma expressão pouco significativa da área de estudo (declive médio cerca de 10°; altitude baixa). Todos os outros tipos de solos encontram-se dispersos pela área de estudo de acordo com a tabela e o mapa

Geologia

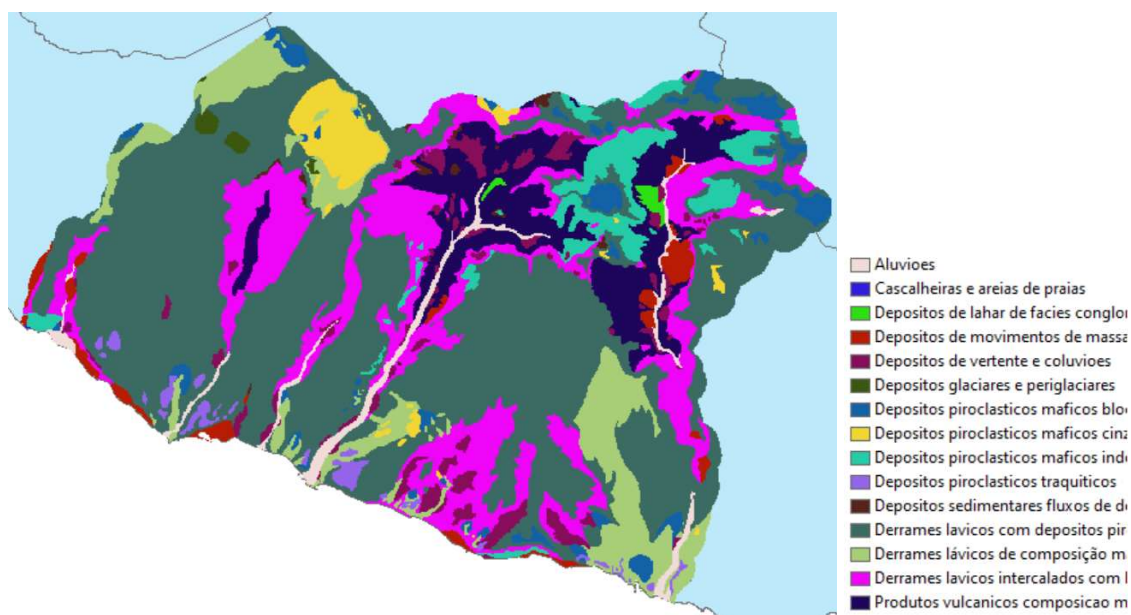


Figura 6 - Classes de unidades geológicas/ litológicas

A litologia foi obtida a partir da Carta Geológica da Ilha da Madeira, na escala 1:50000. Devido à semelhança entre algumas unidades litológicas da área de estudo, das 21 classes originais para área de estudo, reclassificou-se de modo a ter 15 classes.

Quadro 5 - Generalização das classes de unidades geológicas/ litológicas

Código	Classes originais	Classes Reclassificadas
a	Aluviões	
cap	Cascalheiras e areias de praias	
La	Depósitos de <i>lahar</i> constituídos por fácies conglomeráticas e brechóides associados a fluxos de detritos e fluxos de lama, e/ou depósitos de movimentos de massa, do tipo avalanche de detritos associados a deslizamentos	Depósitos de fácies conglomeráticas e brechóides associados a fluxos de detritos e de lama, e/ou depósitos de movimentos de massa
dm	Depósitos de movimentos de massa, do tipo avalanche de detritos associados a deslizamentos e desabamentos; brechas sedimentares, conglomerados e mega-blocos de rocha fraturada	Depósitos de movimentos de massa; brechas sedimentares, conglomerados e mega-blocos de rocha fraturada
dv	Depósitos de vertente e colúviões	
Dgp	Depósitos glaciares e periglaciares	
CVM1B	Produtos vulcânicos subaéreos de composição máfica e sedimentos detríticos indiferenciados; intercalações sedimentares de fácies conglomeráticas, brechóides e areníticas	
CVM2B	Derrames lavícos subaéreos de composição máfica (basanitos e basaltos), com intercalações ocasionais de tufos basálticos (escórias, <i>lapilli</i> e cinzas) e produtos de actividade freato-magmática)	Derrames lavícos de composição máfica (basanitos e basaltos), com intercalações de tufos basálticos (escórias, <i>lapilli</i> e cinzas)
CVM2g	Depósitos sedimentares de fácies brechóides, conglomeráticas e areníticas grosseiras, associados a fluxos detríticos ou fluxos de lama (<i>lahares</i>) e ocasionais depósitos de avalanche de detritos relacionados com deslizamentos	Depósitos sedimentares de fácies conglomeráticas, brechóides e areníticas, associados a fluxos de detritos ou fluxos de lama
CVM3g	Depósitos sedimentares de fácies conglomeráticas, brechóides e areníticas, associados a fluxos de detritos ou fluxos de lama (<i>lahares</i>) e fluxos hiperconcentrados	

CVS2g	Depósitos sedimentares de fácies conglomeráticas, brechóides e areníticas, associados a fluxos de detritos ou fluxos de lama (<i>lahares</i>) e fluxos hiperconcentrados	
CVM2 pi	Depósitos piroclásticos máficos subaéreos indiferenciados: tufo de escórias e <i>lapilli</i> de cones estrombolianos/havaianos, piroclastos de queda distais e ocasionais produtos freatomagmáticos	Depósitos piroclásticos máficos indiferenciados: tufo de escórias e <i>lapilli</i> , piroclastos
CVM3 pi	Depósitos piroclásticos máficos subaéreos indiferenciados: tufo de escórias e <i>lapilli</i> de cones estrombolianos/havaianos, piroclastos de queda distais, ocasionais produtos de atividade freato-magmática e níveis de tufo de cinzas traquíticas	
CVM3B	Derrames lávicos subaéreos de composição máfica (basaltos e basanitos) com intercalações de depósitos piroclásticos de queda (escórias, <i>lapilli</i> e cinzas basálticas), níveis de tufitos e ocasionais produtos máficos de atividade freato-magmática	Derrames lávicos de composição máfica (basaltos e basanitos), com intercalações de tufitos e de depósitos piroclásticos (escórias, <i>lapilli</i> e cinzas basálticas)
CVS1B	Derrames lávicos subaéreos de composição máfica (basaltos e basanitos), com intercalações de tufitos, depósitos piroclásticos de queda (escórias, <i>lapilli</i> e cinzas basálticas) e ocasionais produtos máficos de atividade freato-magmática	
CVS1pic	Depósitos piroclásticos máficos subaéreos: blocos e bombas, <i>lapilli</i> e cinzas de cones estrombolianos / havaianos	Depósitos piroclásticos máficos: blocos e bombas, <i>lapilli</i> e cinzas
CVS2pic		
CVS1pid	Depósitos piroclásticos máficos subaéreos distais: cinzas e <i>lapilli</i> de queda, geralmente alterados	Depósitos piroclásticos máficos: cinzas e <i>lapilli</i>
CVS2pid		
CVS2B	Derrames lávicos subaéreos de composição máfica (basaltos), com intercalações ocasionais de piroclásticos de queda (escórias, <i>lapilli</i> e cinzas basálticas) e produtos de atividade freato-magmática	Derrames lávicos de composição máfica (basaltos), com intercalações de piroclásticos (escórias, <i>lapilli</i> e cinzas basálticas)
CVS2pihT	Depósitos piroclásticos hidroplinianos traquíticos (tufo de cinzas e pedra-pomes), com intercalações de piroclastos hidromagmáticos máficos, piroclastos subaéreos de queda e níveis de tufito	Depósitos piroclásticos traquíticos (tufo de cinzas e pedra-pomes), com intercalações de piroclastos máficos, piroclastos e níveis de tufito

Fonte: adaptado de Simões, (2015).

Pela análise da Figura__ e da tabela__ observa-se que o tipo de solo com maior predominância, com cerca de metade (48,3%) da área de estudo, tem um solo com *Derrames lávicos subaéreos de composição máfica (basaltos), com intercalações ocasionais de piroclásticos de queda (escórias, lapilli e cinzas basálticas) e produtos de atividade freato-magmática* (CVM3B) e *Derrames lávicos subaéreos de composição máfica (basaltos e basanitos), com intercalações de tufitos, depósitos piroclásticos de queda (escórias, lapilli e cinzas basálticas) e ocasionais produtos máficos de atividade freato-magmática* (CVS1B). Estes foram reclassificados num único tipo de solo, *Derrames lávicos de composição máfica (basaltos e basanitos), com intercalações de tufitos e de depósitos piroclásticos (escórias, lapilli e cinzas basálticas)* com o código CVMB que ocupa uma área de cerca de 8900 ha. Este tipo de solo encontra-se disperso na área de estudo, com especial concentração nas vertentes a sul; em áreas de declive médio com cerca de 30°.

Um outro tipo de litologia que existe com alguma expressividade, com cerca de 15% da área de estudo são os *Derrames lávicos subaéreos de composição máfica (basanitos e basaltos), com intercalações ocasionais de tufo basáltico (escórias, lapilli e cinzas) e produtos de actividade freato-magmática* com o código CVM2B que ocupa uma área de cerca de 3000 há

A classe dv, *Depósitos de vertente e coluviões* cobre cerca de 5% e encontra-se principalmente na Ribeira Brava, Ribeira dos Socorridos e na Ribeira da Ponta do Sol; encontra-se em declives médios de cerca de 40°.

As formações predominantemente sedimentares localizam-se essencialmente em fundos e vale e na faixa costeira.

Quadro 6 - Frequência (ha e %) das classes de Litologia

Cod	Descricao	AREA (ha)	%
a	Aluvioes	366	2,0
cap	Cascalheiras e areias de praias	1	0,0
la	Depositos de lahar de facies conglom. e fluxos detritos e lama	48	0,3
dm	Depositos de movimentos de massa tipo avalanhe	317	1,7
dv	Depositos de vertente e coluvioes	608	3,3
dgp	Depositos glaciares e periglaciares	63	0,3
CVSpic	Depositos piroclasticos maficos blocos e bombas	565	3,0
CVSpid	Depositos piroclasticos maficos cinzas	477	2,6
CVMpi	Depositos piroclasticos maficos indeferenciados	769	4,1
CVS2pihT	Depositos piroclasticos traquiticos	183	1,0
CVMg	Depositos sedimentares fluxos de detritos ou lama	60	0,3
CVMB	Derrames lavicos com depositos piroclasticos	8985	48,3
CVS2B	Derrames lavicos de composicao mafica basaltos e piroclastos	1469	7,9
CVM2B	Derrames lavicos intercalados com basaltos	3074	16,5
CVM1B	Produtos vulcanicos composicao mafica areniticas	1614	8,7

onte: adaptado de Simões, (2015).

Uso do solo

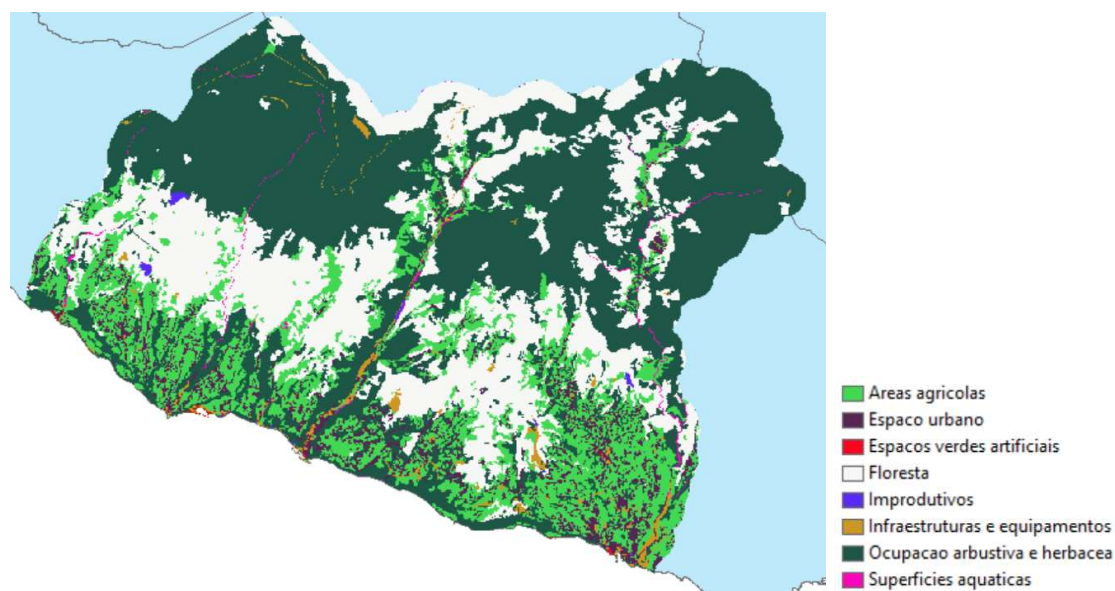


Figura 7 – Ocupação do solo

A informação da ocupação do solo é obtida da Carta de Ocupação do Solo da Região Autónoma da Madeira (COS-RAM), de 2007, à escala 1:25000. De acordo com esta cartografia, na área de estudo identificam-se 82 classes de ocupação de solo. Estas foram agrupadas com base nas suas semelhanças, tendo como referência o nível 1 de discriminação (DGT, 2018), das quais resultaram apenas 8 classes (Quadro 7).

Quadro 7 – Classes ocupação do solo

Classes original	Reclassificação (8 classes)
Agricultura com espaços naturais e semi-naturais Bananal Cultura de cana-de-açúcar Culturas temporárias de regadio Culturas temporárias de regadio associadas a pomar Culturas temporárias de regadio associadas a vinha Estufas e viveiros Novas Plantações Outros Pomares Pastagens Permanentes Pomares de citrinos Pomares de frutos frescos Pomares de frutos tropicais Sistemas culturais e parcelares complexos Vinhais Viveiros florestais	Áreas agrícolas
Áreas abandonadas em território artificializado Áreas em construção Canais artificiais Tecido urbano contínuo pred. horizontal Tecido urbano contínuo pred. vertical Tecido urbano descontínuo Tecido urbano descontínuo esparso	Espaço urbano
Parques e jardins	Espaços verdes artificiais
Cortes rasos Floresta natural da Madeira Florestas abertas de castanheiro Florestas abertas de espécies invasoras com resinosas Florestas abertas de eucalipto Florestas abertas de eucalipto com resinosas Florestas abertas de outras resinosas Florestas abertas de pinheiro bravo Florestas abertas de pinheiro bravo com folhosas Florestas de castanheiro Florestas de castanheiro com folhosas Florestas de castanheiro com resinosas Florestas de espécies invasoras Florestas de espécies invasoras com folhosas Florestas de espécies invasoras com resinosas Florestas de eucalipto Florestas de eucalipto com folhosas Florestas de eucalipto com resinosas Florestas de misturas de folhosas com resinosas Florestas de misturas de resinosas com folhosas Florestas de outra folhosa com folhosas Florestas de outra folhosa com resinosas Florestas de outras folhosas Florestas de outras resinosas Florestas de outras resinosas com folhosas Florestas de pinheiro bravo Florestas de pinheiro bravo com folhosas Florestas de pinheiro bravo com resinosas	Floresta
Aterros Cemitérios Lixeiras e Sucatas Pedreiras	Improdutivos

Áreas de estacionamento e logradouros Comércio Equipamentos culturais e zonas históricas Equipamentos públicos e privados Indústria Infraestruturas de captação, tratamento e abastecimento de água para consumo Infraestruturas de produção de energia não renovável Infraestruturas de produção de energia renovável Infraestruturas de tratamento de resíduos e águas residuais Instalações Agrícolas Marinas e docas pesca Outras instalações desportivas Rede viária e espaços associados Reservatórios de represas ou de açudes Terminais portuários de mar e de rio	Infraestruturas e equipamentos
Áreas ardidas Matos densos autóctones Matos densos exóticos Matos pouco densos autóctones Matos pouco densos exóticos Praias, dunas e areais costeiros Rocha nua Vegetação herbácea natural	Ocupação arbustiva e herbácea
Cursos de água naturais Lagoas costeiras Paúis	Superfícies aquáticas

Fonte: adaptado de Simões, (2015).

Tendo em conta a Figura 7 e o Quadro 7 observa-se que grande parte da área de estudo é coberta pela classe “Ocupação arbustiva e herbácea” com uma cobertura perto de 46,6% da área com 8669 ha. A classe “floresta”, que coincide com a floresta de Laurissilva, cobre uma área com cerca de 5295 ha, representando aproximadamente 28,5% da área de estudo.

A classe representando as “áreas agrícolas” tem uma expressão mais reduzida, com apenas cerca de 17,9% da área com 3321 ha. As restantes 5 classes têm pouca relevância, representando em conjunto de cerca de 7% da área de estudo.

É importante referir que as “Áreas aquáticas” incluem pequenas áreas e formas longitudinais; que remetem para as linhas de água nos fundos de vale.

Uma outra análise que se pode obter é que as altitudes mais elevadas e os declives mais acentuados condicionam a distribuição da ocupação do solo, assim como também a proximidade da linha de costa ou o interior.

Quadro 8 - Frequência (ha e %) das classes de uso do solo

DES CLAS	AREA (ha)	AREA (m2)	COUNT	%
Áreas agrícolas	3321	33207450	1328298	17,9
Espaço urbano	953	9533800	381352	5,1
Espaços verdes artificiais	5	45500	1820	0,02
Floresta	5295	52954450	2118178	28,5
Improdutivos	30	302175	12087	0,2
Infraestruturas e equipamentos	232	2315600	92624	1,2
Ocupação arbustiva e herbácea	8669	86688200	3467528	46,6
Superfícies aquáticas	86	863075	34523	0,5

Os métodos Valor informativo e Probabilidade Bayesiana

Depois de apresentadas as variáveis, descrevem-se os métodos estatísticos bivariados a serem aplicados na criação do modelo. A avaliação da suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos utiliza um método indireto assente numa abordagem estatística, em que a influência de cada fator condicionante é determinada com base nas relações espaciais observadas com a distribuição dos deslizamentos já ocorridos. Deste modo, a avaliação da suscetibilidade é efetuada de forma objetiva, visto que os fatores condicionantes da instabilidade e suas inter-relações são quantificados estatisticamente com base na relação entre as áreas das classes de entidades (Reis et al. 2003).

Para a criação dos modelos de suscetibilidade foi utilizado o método estatístico bivariado **Valor Informativo** (VI) proposto por Yin e Yan (1988). Este é um método onde cada fator condicionante é combinado individualmente com o mapa de distribuição dos movimentos de vertente, atribuindo a respetiva ponderação com base na densidade de movimentos de vertente, observada em cada classe de cada variável. A sua utilização parte do pressuposto que a área em estudo foi previamente dividida em unidades de terreno homogéneo (Garcia, 2002).

O VI é o logaritmo natural da divisão entre a probabilidade de encontrar uma unidade de terreno deslizada em cada classe de cada variável (probabilidade condicionada – S_i/N_i) e a probabilidade de encontrar uma unidade deslizada na área de estudo (probabilidade *à priori* – S/N), obtido de acordo com a seguinte fórmula (Yan, 1988, in Garcia, 2002):

$$li = \log n \frac{S_i/N_i}{S/N}$$

Em que:

li – valor informativo da variável i ;

S_i – número de unidades de terreno (UT) com fenómeno perigoso e com presença da variável i ;

N_i – número de UT com a variável i ;

S – número de UT com fenómeno perigoso;

N – número de UT existentes na área de estudo.

A suscetibilidade com base **probabilidade bayesiana** baseia-se na análise condicionada, pelo que o cálculo deste parâmetro é essencial para a sua obtenção. Neste sentido, a probabilidade bayesiana apresenta algumas semelhanças com o Valor Informativo.

Seguindo a formulação da probabilidade condicionada, o cálculo da probabilidade bayesiana resultante da integração de variáveis condicionantes, faz-se de acordo com a expressão seguinte na sua forma geral:

$$p(\varepsilon|V_{1j} \cap V_{2j}) = \frac{p(\varepsilon|V_{1j})p(\varepsilon|V_{2j})}{p(\varepsilon)} \cdot \frac{p(V_{1j})p(V_{2j})}{p(V_{1j} \cap V_{2j})}$$

A criação do Modelo

Tendo reunidas a variável dependente e as quatro variáveis independentes reclassificadas e convertidas em dados matriciais, assim como também os dois métodos a utilizar para a criação do modelo de avaliação e classificação da suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos assente

num conjunto de condicionantes físicas, iniciamos os procedimentos para a elaboração do modelo.

Criou-se um novo tema, um mapa *booleano* através de um processo de reclassificação, em que se atribuiu valor 1 às células que representam áreas com presença de deslizamentos e valor 0 às células que representam áreas com ausência de deslizamentos. O processamento foi circunscrito à área de estudo.

Os cálculos das probabilidades espaciais, da probabilidade *a priori* e da probabilidade condicionada, são utilizados no cálculo do Valor Informativo e da probabilidade Bayesiana.

Para cálculo das probabilidades *a priori* e condicionada, as variáveis condicionantes (declive, solos, geologia e uso do solo) devem estar classificadas. Isto implica que, previamente, as variáveis contínuas devam ser classificadas.

A probabilidade *a priori* de encontrar deslizamentos na área de estudo é de 0,0012, que é a divisão da área total com deslizamentos pela área de estudo na sua totalidade. Neste caso representa a probabilidade espacial de encontrar um determinado elemento (valor) na área de estudo.

Seguidamente a probabilidade condicional representa a probabilidade de encontrar um determinado evento dependente associado à presença de um fator (ou classe desse fator) na área de estudo. Toma a seguinte forma geral, em que representa a probabilidade condicionada da ocorrência de A dependente da existência de B:

$$P(A|B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)}, \quad \text{ou} \quad P(\varepsilon|F_{classe}) = \frac{\text{Área de } \varepsilon \text{ em } F_{classe}}{\text{Área de } F_{classe}}$$

em que ε é a variável dependente (declive, solos, geologia e uso do solo) e F_{classe} é a classe de um determinado fator que condiciona essa variável. Cada um destes quatro novos temas foi exportado com GRID e com cell size 5.

A probabilidade condicional é a divisão da área de cada classe pela área total de cada fator condicionante.

Calculou-se o **Valor Informativo** (VI) associado às diversas classes de cada uma das variáveis, tendo por base os deslizamentos. Na sequência dos parâmetros anteriormente calculados, pode-se dizer que o VI é o logaritmo natural da divisão entre a probabilidade de encontrar uma unidade de terreno com deslizamentos em cada classe de cada variável (probabilidade condicionada) e a probabilidade de encontrar uma unidade com deslizamentos na área de estudo (probabilidade *a priori*).

$$VI = \log_n \frac{Si/Ni}{S/N} \quad \text{ou} \quad VI = \log_n \frac{\text{Area_Desliz_classe} / \text{Area_classe}}{\text{Area_Desliz_total} / \text{Area_de_estudo}}$$

A segunda fórmula é para este caso específico, em que o numerador é a probabilidade condicionada e o denominador é a probabilidade *a priori*.

Podemos calcular VI com Logaritmo da probabilidade condicionada a dividir pela *a priori* (0,0012) para cada um dos 4 fatores (declive, solos, geologia e uso do solo), resultando novos quatro temas. Todas as classes dos 4 fatores que tenham valor 0 terá que ser alterado para o valor mínimo existente menos uma décima, pois não pode haver valores nulos.

$$Vi_Final = [Tema1_rci] + [Tema2_rci] + [Tema3_rci] \dots$$

Para obter o VI final faz-se o somatório de todos os quatro temas VI_declive, VI_solos, VI_geologia e VI_uso do solo.

Nos dois mapas seguintes apresenta-se os resultados do valor informativo, com dados contínuos e com dados classificados.

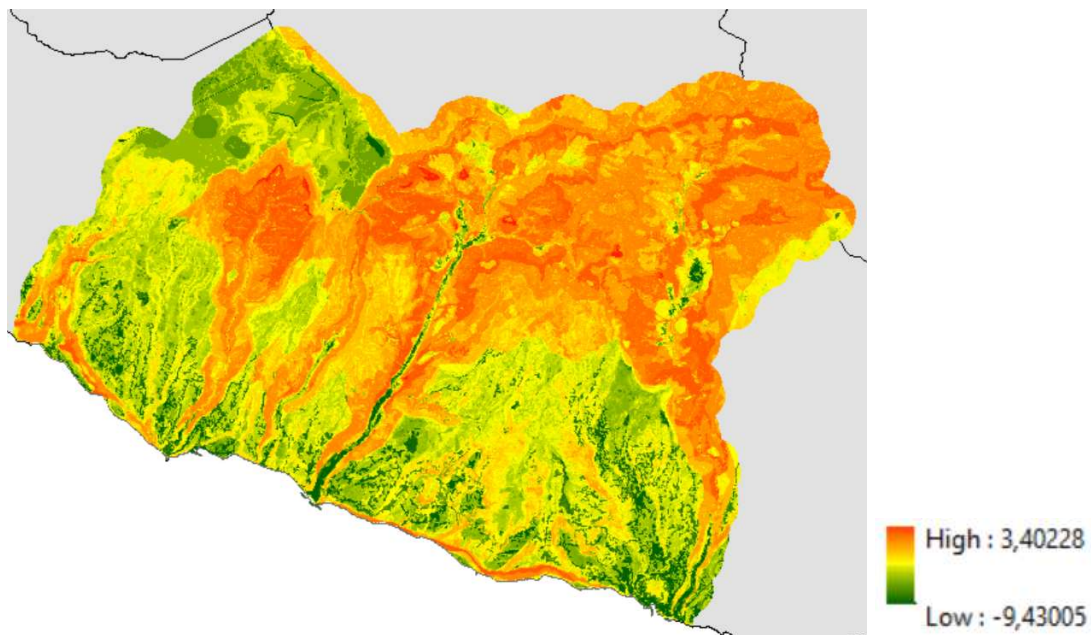


Figura 8 - Suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos com base no valor informativo (dados contínuos).

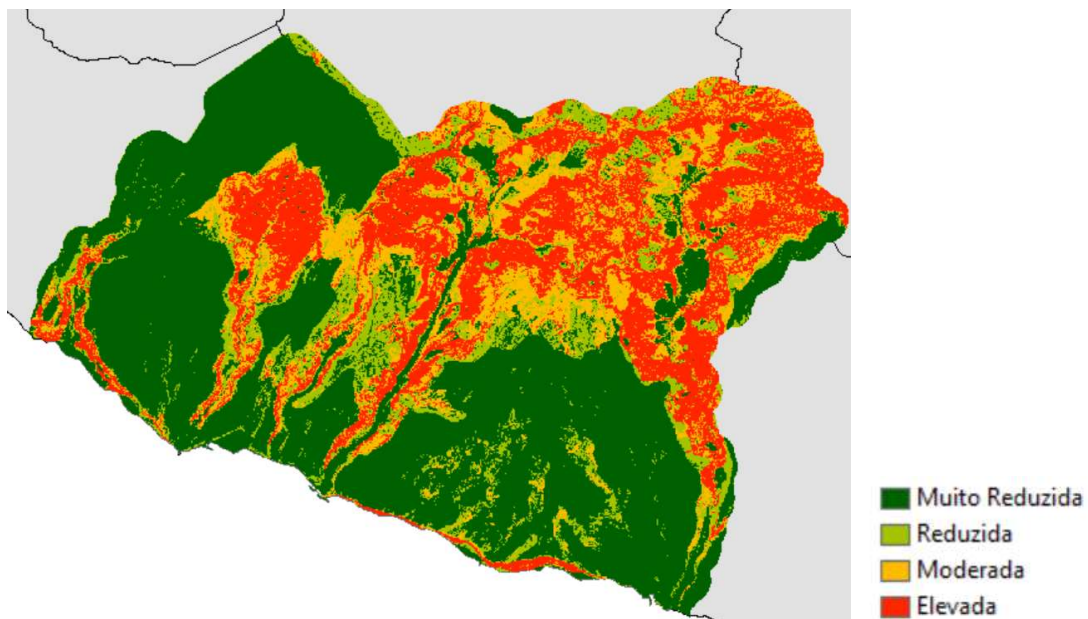


Figura 9 - Suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos com base no valor informativo (dados classificados com base no desvio padrão).

O método do Valor Informativo tem uma base Bayesiana, como vimos é sustentado na transformação logarítmica (log natural) da razão entre probabilidade condicionada e probabilidade *a priori*. Desta forma, e por continuidade racional, utilizaremos o método da probabilidade bayesiana.

O processo de cálculo da **probabilidade Bayesiana** à ocorrência de deslizamentos tendo por base 4 variáveis condicionantes (declive, solos, geologia e uso do solo) apresenta a seguinte formulação:

$$p(Inc|OcSolo \cap Decl \cap Vias_dist \cap Urbes_dist) = \frac{p(Inc|OcSolo)p(Inc|Decl)p(Inc|Vias_dist)p(Inc|Urbes_dist)}{p(Inc)^{n-1}} \cdot \frac{p(OcSolo)p(Decl)p(Vias_dist)p(Urbes_dist)}{p(OcSolo \cap Decl \cap Vias_dist \cap Urbes_dist)}$$

A expressão anterior exige, assim, o cálculo de 10 mapas:

- 4 mapas com a probabilidade condicionada associada a cada classe das 4 variáveis.
- 4 mapas com a probabilidade a priori associada a cada classe das 4 variáveis, dividindo o valor da área de cada classe pela área total de estudo;
- 1 mapa com a probabilidade a priori ($n-1$ será $4-1=3$) de encontrar áreas com deslizamentos na área de estudo,
- 1 mapa com a probabilidade conjunta de encontrar as diversas classes das 4 variáveis independentes, ou seja, de encontrar cada unidade de terreno.

Probabilidade condicionada associada a cada classe das variáveis

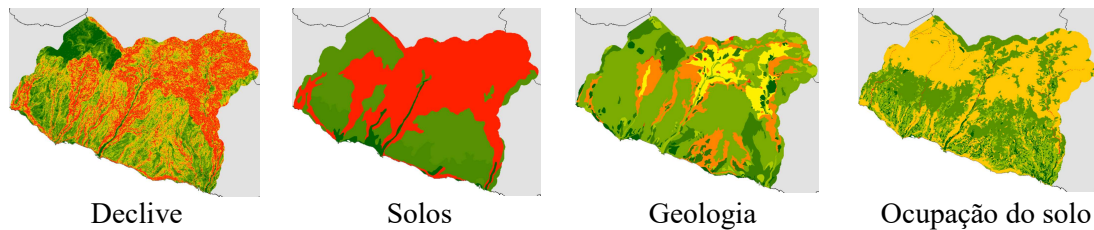


Figura 10 - prob. condicionada

Probabilidade a priori associada a cada classe das variáveis

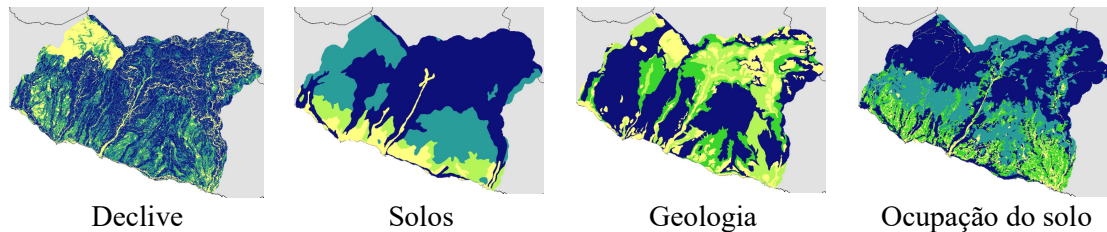


Figura 11 - prob. *a priori*

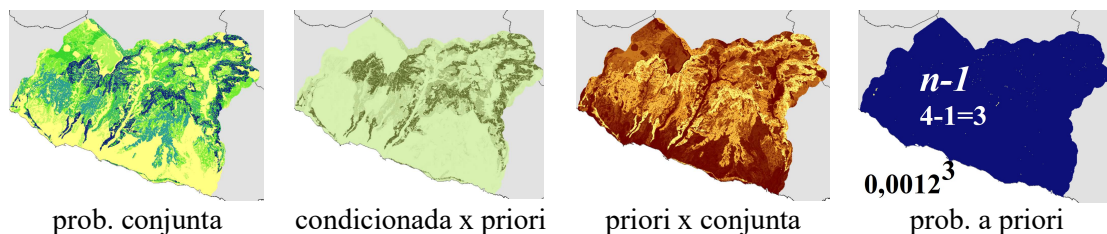


Figura 12 – probabilidade conjunta

Probabilidade conjunta é a probabilidade de encontrar as diversas classes das variáveis independentes envolvidas. Resulta da interseção das várias classes das variáveis independentes utilizadas. Deste modo, os mapas que representam as 4 variáveis condicionantes foram

combinados (combine do Arc toolbox) de modo a ter um mapa com os 4 fatores. A probabilidade conjunta de encontrar as diversas classes das variáveis independentes obtém-se dividindo a área de cada interseção pela área total.

A integração bayesiana fez-se através da expressão algébrica apresentada anteriormente, para as 4 variáveis independentes utilizadas.

Nos dois mapas seguintes apresentam-se os resultados da probabilidade bayesiana, com dados contínuos e com dados classificados.

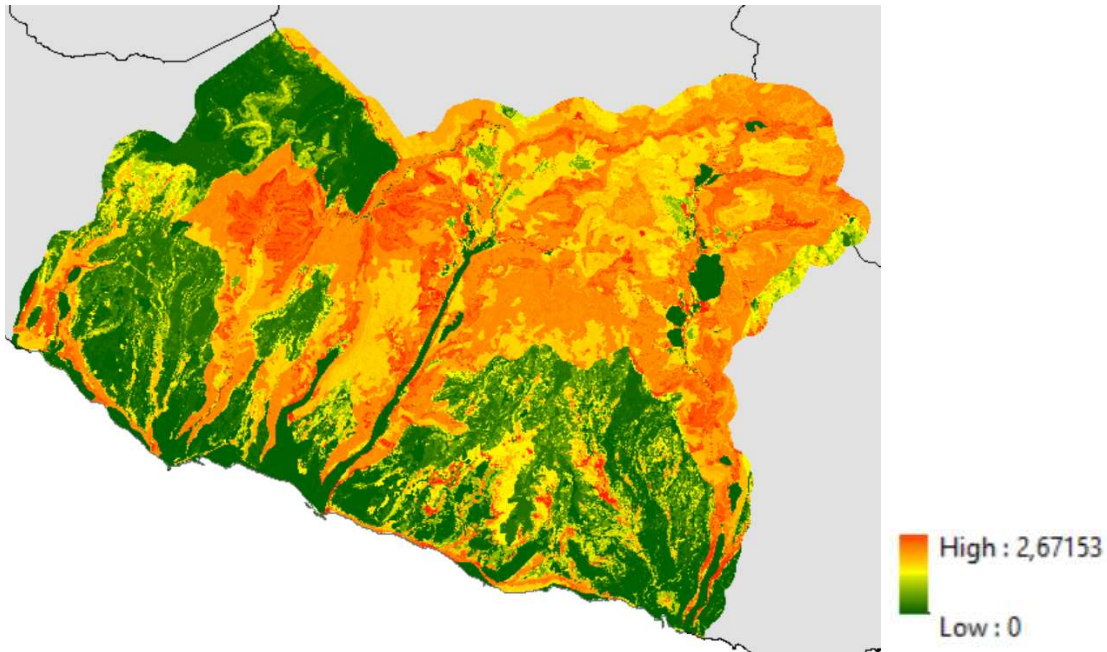


Figura 13 - Suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos com base na probabilidade bayesiana (dados contínuos).

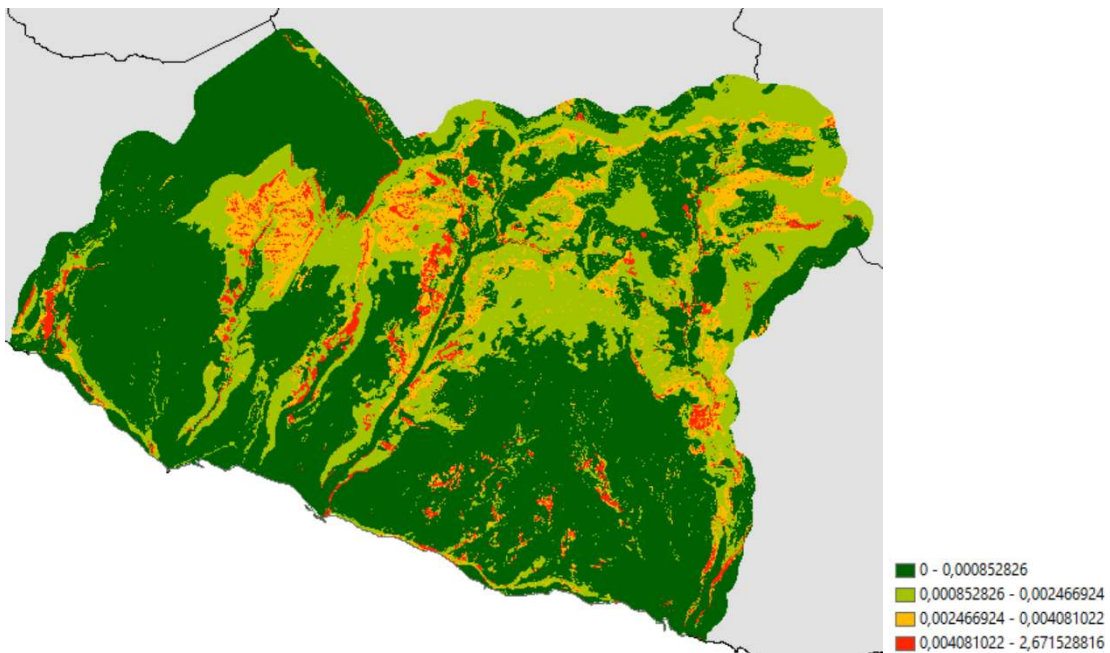


Figura 14 - Suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos com base na probabilidade bayesiana (dados classificados com base no desvio padrão).

Resultados

Após a modelação dos dados de modo a possibilitar a avaliação da suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos com base no Valor Informativo e na Probabilidade Bayesiana, iremos fazer uma comparação dos mapas extraídos dos dois modelos, ou seja, cartografar os resultados de modo a perceber quais as áreas de maior risco de deslizamento na área de estudo, quer num modelo, quer no outro.

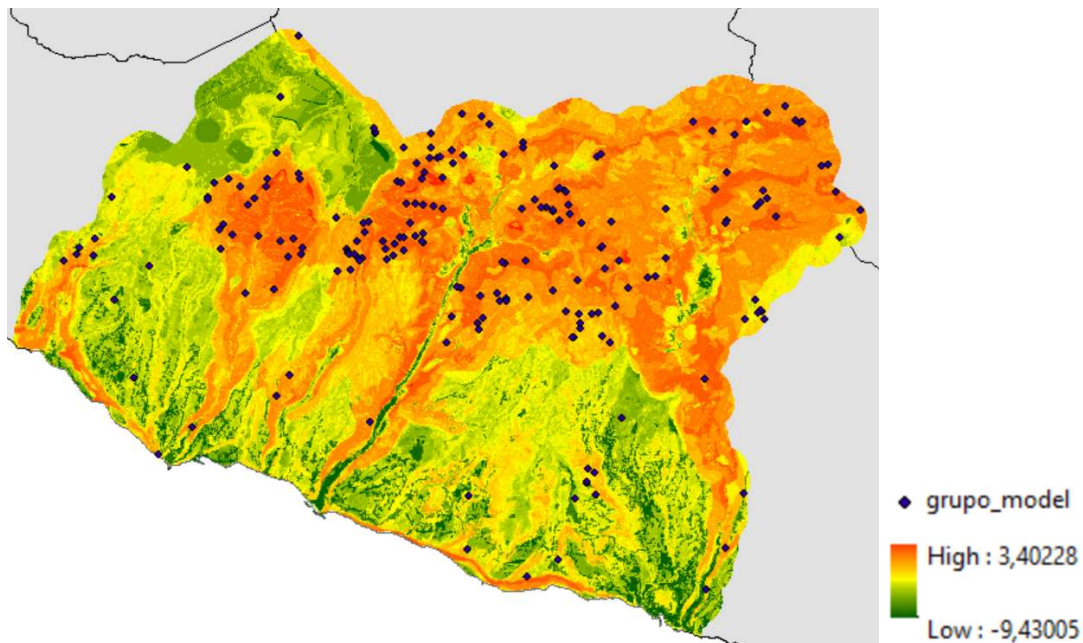


Figura 15 – Probabilidade de ocorrência de deslizamentos com base no valor informativo e usado o grupo de modelação com 50% dos deslizamentos (dados contínuos).

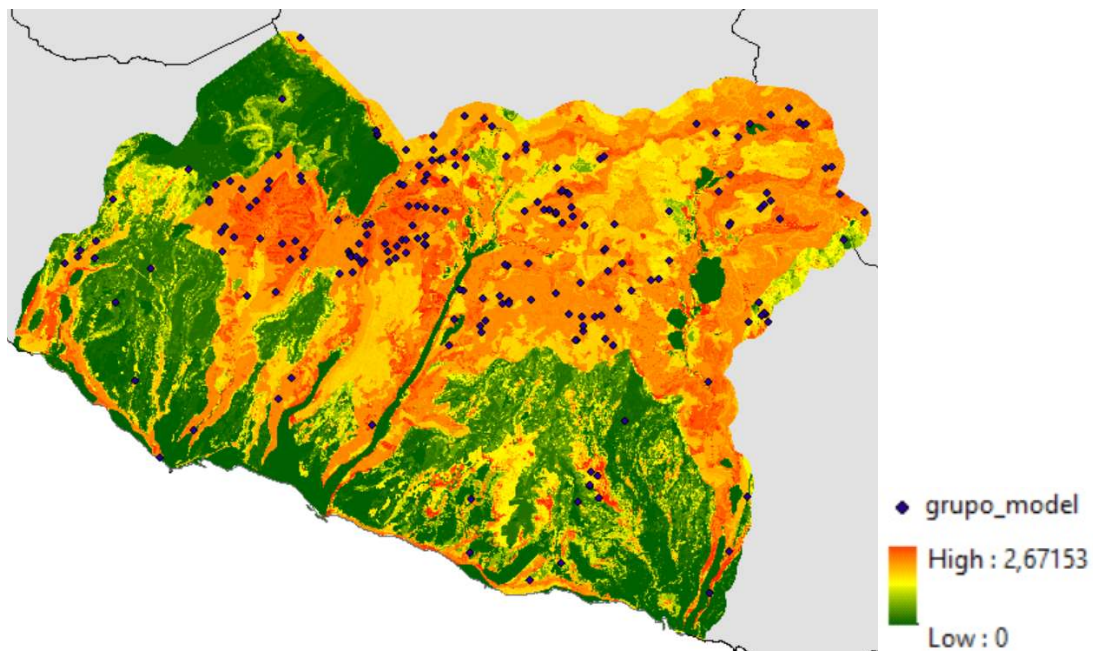


Figura 16 – Probabilidade de ocorrência de deslizamentos com base na probabilidade bayesiana e usado o grupo de modelação com 50% dos deslizamentos (dados contínuos).

A comparação dos dois modelos apresenta resultados bastante similares. Talvez fosse de esperar, pois o método do valor informativo tem uma base bayesiana. A avaliação com base na observação dos dois mapas (dados contínuos) faz crer que o da probabilidade bayesiana é mais nítido e contrastante, permitindo uma leitura mais clara.

Como pode ser observado nas duas figuras anteriores, os deslizamentos não estão presentes em áreas com probabilidade nula, e a maior parte dos eventos ocorrem na de elevada probabilidade (cerca de 75%). Na área de maior probabilidade está presente apenas uma pequena percentagem da área dos deslizamentos; no entanto, isto deve-se apenas à reduzida área que ocupa na área de estudo.

As áreas previstas como as mais perigosas têm uma relação próxima com as vertentes mais declivosas, mesmo em condições litológicas e de ocupação do solo distintas, embora as áreas com cobertura arbórea sejam geralmente consideradas seguras. Esta predição confirma que a declive das vertentes é o principal fator condicionante dos deslizamentos.

Validação

Os mapas de suscetibilidade com base em modelos preditivo devem ser validados, ou seja, avaliar a sua capacidade preditiva em relação a futuros movimentos de vertente. Estes apenas fornecem uma classificação da área de estudo em termos de “probabilidade espacial”, pelo que a sua capacidade de predição de futuros movimentos necessita de ser validada (Zêzere *et al.*, 2004; Pereira, 2009). Chung e Fabbri (2003) consideram insignificantes, e mesmo inúteis do ponto de vista científico, os modelos preditivos sem qualquer de validação.

Com base neste pressuposto iniciamos um processo de validação do modelo tendo em conta os métodos descritos seguidamente: a **validação imediata** com a matriz de classificação e o diagnóstico de multicolinearidade, obtidos através de regressão logística.

A validação imediata dos mapas de suscetibilidade geomorfológica não é possível nos métodos de cartografia direta, mas é viável nos métodos indiretos dos tipos estatístico (Garcia, 2012).

A avaliação da validade de mapas de perigosidade consiste na comparação direta entre o mapa de predição com o mapa de inventário de movimentos de vertente passados que lhe deu origem, permitindo: a) analisar a abundância de movimentos de vertente conhecidos numa região; b) avaliar o papel de cada mapa temático utilizado na construção do modelo; c) avaliar a capacidade do modelo em assimilar as variações nos dados de entrada; d) determinar o erro associado às classes de suscetibilidade estimadas (Guzzetti et al, 2006). Recorremos então à regressão logística com variáveis categóricas para verificar a significância estatística de destes indicadores.

A matriz de classificação permite uma validação imediata no caso verifica-se que o valor fica um pouco a baixo de 75% que é o valor para atribuir aceitável à qualidade do modelo.

Quadro 9 – Extraído da regressão logística, matriz de classificação

Tabela de Classificação^a

a. O valor de recorte é ,500

Observado		Previsto		Porcentagem correta
		0	1	
Etapla 1	id			
	0	129	72	64,2
	1	43	158	78,6
Porcentagem global				71,4

O coeficiente de colinearidade é o ajustamento de modelos através de regressão logística. É sensível à colinearidade entre as variáveis independentes (Hosmer e Lemeshow 1989). A tolerância (TOL) e o fator de inflação da variância, *variance inflation factor* (VIF) são dois importantes índices de colinearidade. Um valor de TOL inferior a 0,2 é um indicador de colinearidade entre variáveis independentes, e um valor de TOL inferior a 0,1 sugere uma colinearidade grave (Menard 1995). Neste estudo, ambos os índices foram calculados (Tabela), e as variáveis encontram-se dentro dos parâmetros, $VIF > 2$ e $TOL < 0,4$ da análise logística (Bai et al, 2011). Um pouco mais adiante é apresentado o procedimento para obter estes dados (matriz, vif e tol) no software estatístico.

Quadro 10 – Extraído da regressão logística, coeficiente de colinearidade

Coeficientes ^a		Estatísticas de colinearidade	
Modelo		Tolerância	VIF
1	dec_clasf	,658	1,521
	solo_clasf	,619	1,616
	geo_clasf	,955	1,047
	cos_clasf	,883	1,132

a. Variável Dependente: id

Verifica-se que os valores obtidos para cada uma das variáveis independentes está dentro dos parâmetros estatísticos.

Para validar o modelo de forma mais consistente foi usada a **Partição de dados Aleatória** que assenta nos seguintes pontos e através da regressão logística:

- Divisão aleatória dos movimentos de vertente ocorridos numa área em dois grupos (grupo de modelação e grupo de validação), idealmente equilibrados em número de ocorrências/área afetada;
- Criação do modelo com base nas ocorrências do grupo de modelação;
- Avaliação do modelo com o base nas ocorrências do grupo de validação;
- Cálculo das respetivas curvas de sucesso e predição.

Esta tem como vantagem o assumir que os movimentos de vertente passados ainda não ocorreram em partes da área de estudo. Utiliza-se quando não há informação suficiente para realizar a partição temporal dos movimentos de vertente.

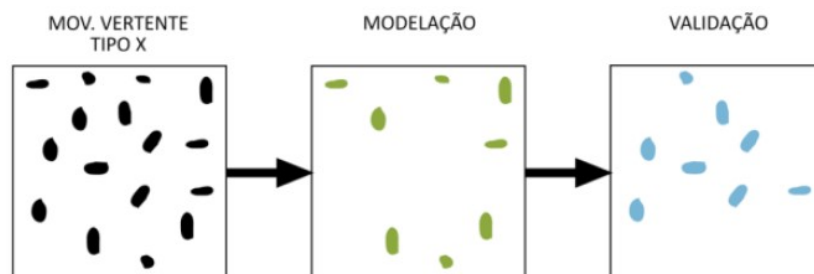


Figura 17 - Esquema da Partição de dados Aleatória

A partição aleatória consiste em dividir de forma aleatória os deslizamentos em dois grupos, devendo, contudo, garantir-se uma distribuição espacial semelhante das áreas instabilizadas em ambos os conjuntos. Isto implica uma análise mais cuidada das taxas de predição obtidas por modelos resultantes desta técnica de partição (Pereira, 2009).

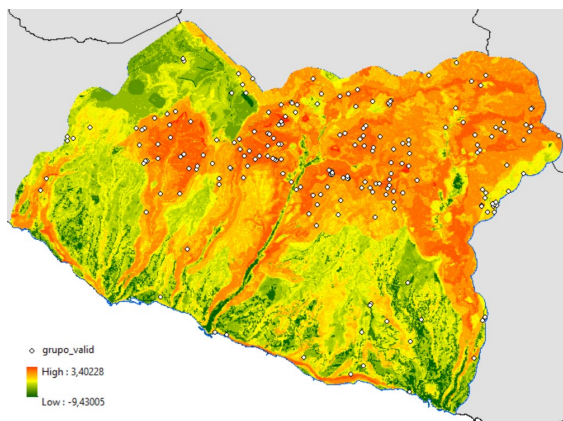


Figura 18A – Probabilidade de ocorrência de deslizamentos com base no **valor informativo** e usado o **grupo de validação** com 50% (dados contínuos).

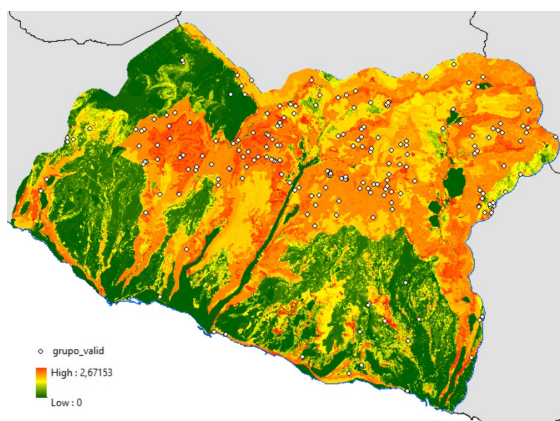


Figura 18B – Probabilidade de ocorrência de deslizamentos com base na **probabilidade Bayesiana** usado o **grupo de validação** com 50% (dados contínuos).

Usou-se o método de cálculo da **Partição de dados Aleatória** das ocorrências de deslizamentos com a utilização do ArcMap 10.7.1 e posteriormente a análise estatística com IBM SPSS Statistics27.

Do total das 402 ocorrências de deslizamentos, converteram-se as áreas do tema vetorial em pontos, ou seja, determinou-se o centroide de cada um dos polígonos com a ferramenta *Feature To Point* do ArcToolbox, dando origem a um novo tema com conversão de polígonos em pontos.

Depois, criou-se uma partição de dados aleatória, ao tema anteriormente criado, utilizando a ferramenta *Subset Features* para selecionar aleatoriamente 50% dos pontos de presença do fenómeno (201 centroides dos deslizamentos) para executar o modelo de Regressão Logística, o grupo de modelação. Os restantes 50% (isto é, 201 centroides) serviram para validar o modelo, o grupo de validação.

Seguidamente criou-se um outro tema com os pontos que fazem parte do grupo de validação. Com recurso à ferramenta *select by location* seleccionou-se na totalidade dos pontos na camada o grupo de modelação e inverteu-se a selecção para obter o grupo de pontos para validação. Exportou-se esta selecção para uma nova camada *shapefile* de dados com o grupo de validação.

Seleccionou-se aleatoriamente 201 pontos de ausência do fenómeno de deslizamentos dentro da área de estudo recorrendo à ferramenta de amostragem *Create Random Points*, criando um novo tema.

Juntou-se num único tema recorrendo à ferramenta *Merge* os pontos de presença do grupo de modelação (id=1) e pontos de ausência (id=0) do fenómeno, criando uma nova camada com os pontos de presença e ausência com 402 registos.

Extraiu-se com *Extract Multi Values to Points* do ArcToolbox, para o tema que agrega os pontos de presença e ausência, o valor de cada uma das quatro variáveis independentes presente no modelo, nos ficheiros reclassificados (declive, solos, geologia e usos do solo).

Exportou-se para dBASE Table (.dbf) a tabela de atributos deste último tema, após efetuar o procedimento descrito, para seguidamente ser analisada estatisticamente.

No software IBM SPSS Statistics (Statistical Package for Social Science), abriu-se a tabela exportada e fez-se uma regressão linear para verificar colinearidade entre as variáveis (TOL e VIF).

A distribuição espacial dos conjuntos de deslizamentos gerados aleatoriamente mostrou: A) a amostra utilizada para integração no modelo e B) a amostra utilizada para avaliação da capacidade de predição do modelo.

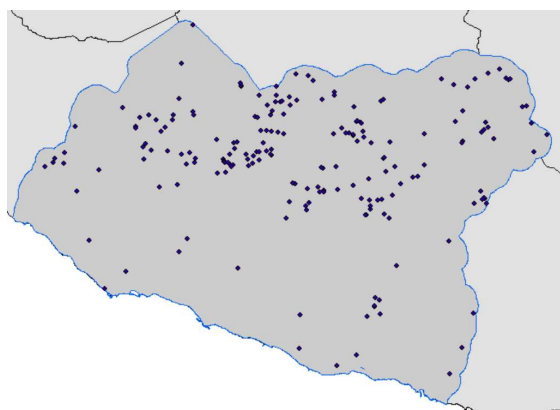


Figura 19A - Deslizamentos 50% grupo modelação

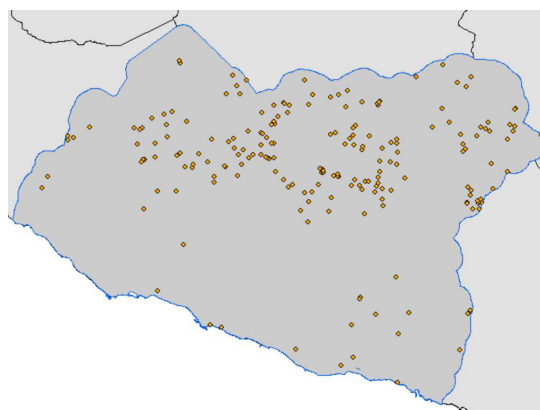


Figura 19B – Deslizamentos 50% grupo validação

Recorrendo novamente ao software IBM SPSS com os mesmos dados de entrada, realizou-se uma regressão logística para obter indicadores que validam os modelos.

Para dar a maior robustez possível à validação do modelo e dos mapas dele extraídos recorreu-se à área sob a curva ROC (*Receiver Operating Characteristic*) utilizada nos modelos de riscos naturais. É uma forma de medir e comparar o desempenho de modelos de previsão, binários. O valor da área sob a curva varia de 0,0 até 1,0 e o limiar entre a classe é 0,5. Ou seja, acima desse limite, o algoritmo classifica numa classe e abaixo numa outra (Van Den Eeckhaut et al. 2006).

Quadro 11 – Extraído da regressão logística, área sob a curva ROC

Área sob a curva ROC

Variável(eis) de resultado de

teste	Área
dec_clasf	,636
solo_clasf	,646
geo_clasf	,552
cos_clasf	,660

A variável ou variáveis de resultado de teste: dec_clasf, solo_clasf, geo_clasf, cos_clasf possuem pelo menos um empate entre o grupo de estado real positivo e o grupo de estado real negativo. As estatísticas podem ser enviesadas.

A validação dos mapas foi obtida através do cálculo da Área Abaixo da Curva ROC, que permite a avaliação quantitativa da capacidade dos modelos preditivos conforme indicação de diversos autores, tendo uma variação entre 0 e 1. Desta forma, quanto mais perto de 1 melhor a capacidade preditiva dos modelos; valores a partir de 0,5, identificam modelos com capacidade preditivas consideradas admissíveis. O objetivo de analisar o poder preditivo de um modelo é garantir que ele irá detetar o máximo possível de verdadeiros positivos (eixo y), enquanto minimiza os falsos positivos (eixo x). Os valores da área sob a curva ROC de toda as variáveis independentes estão

acima do valor de referência que é 0,5, como pode ser observado no quadro acima, o que demonstra um modelo preditivo com qualidade aceitável.

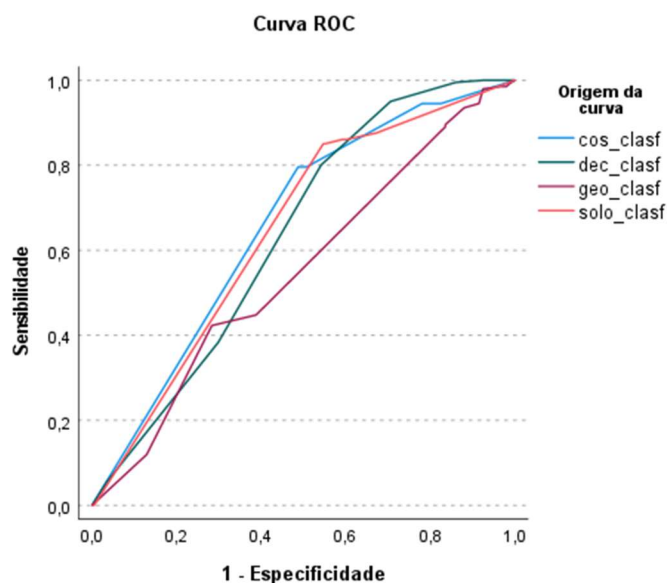


Figura 20 – Gráfico da área abaixo da curva ROC, extraído da regressão logística.

Discussão e notas conclusivas

A aplicação de métodos estatísticos bivariados - Valor Informativo e Probabilidade Bayesiana para a criação de um modelo de avaliação de suscetibilidade à ocorrência de fenómenos perigosos, no caso do movimento de vertentes em particular os deslizamentos, já foi amplamente utilizado, com resultados satisfatórios. A comparação entre estes dois métodos, VI e PB, demonstra que os resultados obtidos por cada um deles são similares, ou seja, confirmam-se mutuamente.

As vantagens dos métodos utilizados são a de serem simples e generalistas. Apresentam ser fidedignos, os algoritmos são de fácil computação e as relações quantitativas entre dados paramétricos e não paramétricos integram-se adequadamente. Quanto aos dados de entrada não necessitam de normalização e o sinal do *score* indica relação ou ausência no software de análise estatística e permite, por fim, uma ponderação para outros modelos.

Os resultados obtidos pelo modelo podem ser considerados bastante satisfatórios, visto que em apenas cerca de 25% da área considerada mais suscetível pode ser encontrada cerca de 75% da área dos deslizamentos conhecidos. Existe, contudo, uma pequena fração dos deslizamentos que não é corretamente prevista pelo modelo, situando-se em áreas onde os valores de suscetibilidade são baixos. Este facto dever-se-á, provavelmente, a alguns fatores que não foram tidos em conta e que podem atuar como condicionantes em relação a um conjunto pequeno de deslizamentos, algumas particularidades como a ação hídrica e pluviométrica e a instabilização provocada pela construção desordenada.

Outras variáveis, como a forma das vertentes, poderão ainda contribuir para melhorar o desempenho do modelo. Por outro lado, o modelo baseia-se unicamente na análise bivariada entre os deslizamentos e os fatores condicionantes, pelo que a relação de dependência entre estes fatores não é considerada (Reis et al. 2003). Por último, os valores obtidos pelo modelo definem a maior ou menor suscetibilidade de virem a ocorrer deslizamentos num futuro.

Os principais tipos de mapas relacionados com a mitigação de deslizamentos são o inventário de deslizamentos, a suscetibilidade a deslizamentos, mapas de perigosidade e mapas de risco de deslizamento. Os mapas de suscetibilidade a deslizamentos são fundamentais para quantificar o risco de deslizamento. Desta forma, a cartografia de suscetibilidade a deslizamentos é vital para a gestão de catástrofes e planeamento do desenvolvimento na área de estudo.

Existem muitas técnicas quantitativas e qualitativas baseadas em SIG que são úteis para analisar a relação entre os deslizamentos e os fatores ambientais.

Neste estudo propõe-se um modelo com base no valor informativo e probabilidade Bayesiana de eventos frequentes de âmbito SIG para o mapeamento da suscetibilidade a deslizamentos nas áreas propensas, onde estes eventos são principalmente desencadeados pela atividade humana e questões naturais (Bai, 2011).

A qualidade da cartografia de suscetibilidade foi validada e a análise da capacidade de previsão mostrou que o mapa de suscetibilidade a deslizamentos pode ser utilizado para o planeamento do território, bem como para o planeamento de emergências pelas autoridades locais.

Referências Bibliográficas

- Bai, S., Lü, G., Wang, J., Zhou, P., & Ding, L. (2011). GIS-based rare events logistic regression for landslide-susceptibility mapping of Lianyungang, China. *Environmental Earth Sciences*, 62, 139-149.
- Castro, J. (2011). *Caracterização hidráulica, hidrológica e de transporte sólido do evento de 20 de Fevereiro de 2010 na Ribeira de João Gomes - Ilha da Madeira*. Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Universidade da Madeira.
- Direção-Geral do Território, 2018. Especificações técnicas da Carta de uso e ocupação do solo de Portugal Continental para 1995, 2007, 2010 e 2015. Relatório Técnico. Direção-Geral do Território. Coordenação: Mário Caetano, Cristina Igreja e Filipe Marcelino
Anexo 1 - Nomenclatura da Carta de Uso e Ocupação do Solo, COS2007v2.0 e COS2010v1.0
- Eeckhaut, M. & Vanwalleghe, T. & Poesen, J. & Govers, Gerard & Verstraeten, Gert & Vandekerckhove, L.. (2006). Prediction of landslide susceptibility using rare events logistic regression: A case-study in the Flemish Ardennes (Belgium). *Geomorphology*. 76. 392-410. 10.1016/j.geomorph.2005.12.003.
- Garcia, R. (2002). *Avaliação do risco de movimentos de vertente na depressão da Abadia. (Torres Vedras)*. Dissertação de Mestrado em Geografia Física e Ambiente, Faculdade de Letras, Universidade de Lisboa.
- GARCIA, RAC & ZÊZERE, J.L. (2004) - "Abadia Bassin (Torres Vedras, Portugal) – a case study of landslide susceptibility assessment and validation" in LACERDA; EHRlich; FONTOURA & SAYÃO (Eds) *Landslides. Evaluation and Stabilization*. Proceedings of the ninth International Symposium on Landslides. Rio de Janeiro. Vol. 1. Taylor and Francis. London. p. 137-142
- Garcia, R. (2012). *Metodologias de Avaliação da Perigosidade e Risco associado a Movimentos de Vertente Aplicação na bacia do rio Alenquer*. Tese de Doutoramento em Geografia Física, Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa.
- Garcia, R., Zêzere, J. e Oliveira, S. (2007). A importância do processo de classificação de dados na cartografia: um exemplo na cartografia de susceptibilidade a movimentos de vertente. Publicações da Associação Portuguesa de Geomorfólogos, Volume V, APGeom, Lisboa, 265–279.
- Henriques, C. (2009). *Dinâmica de vertentes no contexto da Reserva Ecológica Nacional: O caso de estudo do Concelho de Caldas da Rainha*. Dissertação de Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica e Modelação Territorial Aplicados ao Ordenamentos, Faculdade de Letras, Universidade de Lisboa.
- Menard, S. (1995). *Applied Logistic Regression Analysis*. Sage University Paper Series on Qualitative Applications in the Social Sciences, 07-106, Thousand Oaks, CA: Sage.
- Pereira, S. (2009) - *Perigosidade a Movimentos de Vertente na Região Norte de Portugal*. Dissertação de Doutoramento em Geografia Física, Faculdade de Letras, Universidade do Porto.
- Reis, E., Zêzere, J., Vieira, G., e Rodrigues, M. (2003). Integração de dados espaciais em SIG para a avaliação de susceptibilidade à ocorrência de deslizamentos. *Finisterra*, XXXVIII, 17, 3 – 34. <https://doi.org/10.18055/Finis1569>
- Simões, E. (2015). *Análise integrada das condições de ocorrência de deslizamentos e escoadas nas bacias hidrográficas do sector central da Ilha da Madeira*. Tese de Mestrado em Geografia Física, Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa.

Working Party on World Landslide Inventory, UNESCO (1993). *Multilingual Landslide Glossary*. International Geotechnical Societies, Canadian Geotechnical Society Disponível em: [http://www.cgs.ca/pdf/heritage/Landslide Glossary.pdf](http://www.cgs.ca/pdf/heritage/Landslide%20Glossary.pdf)

ZÊZERE, J. L. (2002) – “Landslide susceptibility assessment considering landslide typology. A case study in the area north of Lisbon (Portugal). *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2. p. 73-82.