

Actividade geomorfológica desencadeada pela crise sísmica de 2005 no Vulcão do Fogo (S. Miguel, Açores): avaliação da susceptibilidade com recurso a regressão logística.

Geomorphologic activity on Fogo Volcano (S. Miguel, Azores) triggered by the 2005 seismic crises: susceptibility assessment using logistic regression.

R. Marques¹, G. Queiroz¹, R. Coutinho¹, J. L. Zêzere²

¹ Centro de Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos, Universidade dos Açores, Rui.TF.Marques@azores.gov.pt, Maria.GPS.Queiroz@azores.gov.pt, Rui.MS.Coutinho@azores.gov.pt;

² Centro de Estudos Geográficos, Universidade de Lisboa, jlzezere@fc.ul.pt.

Resumo: Teve início a 10 de Maio de 2005 uma crise sísmica na região sismogénica do Fogo-Congro (S. Miguel, Açores). No período entre Maio e Dezembro de 2005 foram registados aproximadamente 46 000 sismos, dos quais cerca de 180 foram sentidos pelas populações das freguesias próximas da área epicentral. Os sismos mais fortes ocorreram nos dias 20 e 21 de Setembro e atingiram magnitudes (M_L) de 4,1 e 4,3, respectivamente, tendo desencadeado próximo da zona epicentral mais de 250 movimentos de vertente, maioritariamente do tipo escoada de detritos e deslizamentos translacionais superficiais que rapidamente evoluíram para escoadas detríticas. Devido a estes movimentos de vertente algumas estradas rurais ficaram temporariamente bloqueadas e algumas represas foram formadas no sector montante da bacia hidrográfica da Ribeira Grande. Neste trabalho foi efectuada a análise da susceptibilidade à ocorrência de movimentos de vertente à escala regional, adoptando o método da regressão logística (análise estatística multivariada). As variáveis consideradas incluem: distribuição espacial de movimentos de vertente, inclinação e exposição das vertentes, litologia e distância ao epicentro. A incorporação dos dados das variáveis foi feita num SIG, integrando todos os temas cartográficos considerados, permitindo a definição de *scores* para cada condição única e a computação dos valores de favorabilidade (indicadores da susceptibilidade) para cada *pixel* da área de estudo. Os resultados desta metodologia, para a definição da susceptibilidade geomorfológica, foram validados através de uma técnica de correlação cruzada. A série de dados de movimentos de vertente original foi dividida em dois grupos de forma aleatória. O primeiro subconjunto (grupo de computação) foi usado para obter o mapa da predição, e o segundo subconjunto (grupo de validação) foi comparado com os resultados da predição para a validação através da construção de curvas de predição.

Palavras-chave: Movimentos de vertente, sismicidade, mapas de susceptibilidade, modelos probabilísticos, SIG, Açores.

Abstract: A seismic crisis started in Fogo-Congro seismogenic region (S. Miguel Island, Azores), on the May 10th 2005. More than 46 000 earthquakes were registered between May and December, and 180 were felt by the population near the epicentral zone. The two strongest earthquakes occurred on the 20th and 21st September, with magnitudes (M_L) 4,1 and 4,3 respectively, and were responsible for extensive slope failure in the central part of São Miguel Island. More than 250 landslides were triggered, mainly debris flows and shallow soil slips usually evolving downslope into debris flows. Some rural roads were temporarily closed and natural dams were formed along the valleys in the upper sector of Ribeira Grande watershed. In the present work, it was made the landslide susceptibility assessment at the regional scale, using logistic regression (multivariate statistical method). Considered variables include: landslide distribution, slope angle, slope aspect, lithology and distance to earthquake epicentre. Data integration of variables was made in a GIS, overlaying the considered thematic layers allowing the definition of susceptibility scores for each variable case, and the computation of favourability values (susceptibility indicators) for each pixel of the study area. Results of the statistically based landslide susceptibility assessment were validated through an independent cross-validation technique. The original landslide data set was split in two comparable groups using a random criterion. The first sub-set (landslide estimation group) was used to obtain a prediction map, and the second sub-set (landslide validation group) was compared with the prediction results for validation through the computation of prediction-rates curves.

Keywords: Landslides, seismicity, susceptibility map, probabilistic models, GIS, Azores.

1. INTRODUÇÃO

Os movimentos de vertente constituem um dos perigos naturais que mais tem contribuído para a perda de vidas e bens ao longo dos últimos anos, no arquipélago dos Açores. Deste modo, a identificação de áreas susceptíveis à ocorrência deste tipo de fenómeno é essencial para a mitigação deste risco, para o correcto ordenamento do território e planeamento de emergência.

Existem inúmeros métodos para a criação de mapas de susceptibilidade à ocorrência de movimentos de vertente, cada um deles apresentando vantagens e desvantagens. Contudo o fundamento essencial de todos eles reside no mesmo modelo conceptual (Carrara *et al*, 1995; Guzzetti *et al*, 1999): (1) localização geográfica dos movimentos de vertente na área de estudo; (2) cartografia dos factores condicionantes que, directa ou indirectamente, podem influenciar a sua localização; (3) estimação da contribuição relativa de cada um destes factores para a geração da instabilidade e (4) classificação das unidades de terreno utilizadas, de acordo com os diferentes valores de susceptibilidade. Este modelo conceptual para a criação de mapas de susceptibilidade é baseado na suposição de que “os factores condicionantes e desencadeantes que estiveram na origem dos movimentos de vertente passados irão determinar a instabilidade geomorfológica que se vai verificar no futuro” (Hansen, 1984; Hutchinson, 1995; Soeters & van Westen, 1996; Aleotti & Choudhury, 1999; Carrara *et al*, 1995; Zêzere, 2002).

Contrastantes com os mapas de perigosidade, que representam a probabilidade de ocorrência de um movimento de vertente numa determinada área e num determinado período de tempo, concordantes com a definição de perigo natural dada por Varnes (1984), os mapas de susceptibilidade representam unicamente a probabilidade espacial de ocorrência de novos eventos, descurando a informação temporal e a magnitude dos futuros eventos (Carrara *et al*, 1995; Guzzetti *et al*, 2005).

De uma forma muito generalista, nas passadas duas décadas, dois procedimentos distintos têm sido utilizados para a produção de mapas de susceptibilidade com base indirecta, numa tentativa de mitigar esse risco: modelos estatísticos e modelos determinísticos. Para a modelação da susceptibilidade a movimentos de vertente em áreas muito vastas (escala regional), a inexistência de dados geotécnicos a essa escala, associada à impossibilidade monetária e/ou de meios das instituições para os conseguir, determinaram o recurso à modelação com ferramentas estatísticas, em detrimento de ferramentas determinísticas.

De entre os métodos estatísticos, dois emergem claramente da bibliografia: os bivariados e os multivariados. Na análise estatística bivariada cada variável independente é combinada com a variável dependente de forma a calcular o respectivo peso individual, no que concerne à instabilidade das vertentes. Vários métodos estatísticos têm sido utilizados para calcular os pesos das variáveis independentes, entre os quais o método do valor informativo (Kobashi & Suzuki 1988; Yin & Yan, 1988; Zêzere, 2002) e o método dos *weights of evidence* (Spiegelhalter, 1986; Bonham-Carter, 1996).

Por outro lado, na análise multivariada os pesos atribuídos a cada variável independente são calculados de uma forma integrada relativamente à sua importância sobre a variável dependente. Os primeiros trabalhos que visaram a produção de mapas de susceptibilidade com base em métodos estatísticos multivariados foram publicados por Carrara (1983, 1988) e Carrara *et al* (1990, 1991, 1992). Depois destes trabalhos pioneiros, estudos versando esta temática proliferaram na literatura científica, maioritariamente utilizando a análise discriminante, e mais comumente a regressão logística (*e.g.*

Carrara *et al*, 1995; Atkinson & Massari, 1998; Begueria & Lorete, 1999; Dai & Lee, 2003; Vanacker *et al*, 2003; Süzen & Doyuran, 2003; Ayalem & Yamagishi, 2005).

O objectivo principal deste estudo, pioneiro no arquipélago dos Açores, visa a utilização da modelação estatística através de análise regressiva, nomeadamente pela aplicação da regressão logística, para a produção de mapas de susceptibilidade a movimentos de vertente no Vulcão do Fogo, tendo por base os movimentos de vertente desencadeados pelos sismos de 20 e 21 de Setembro de 2005, utilizando um Sistema de Informação Geográfica (SIG).

2. ENQUADRAMENTO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo seleccionada apresenta uma extensão de 168,623 km² e centra-se *grosso modo* em torno do Vulcão do Fogo, também conhecido como Maciço Vulcânico de Água de Pau, situado na parte central da ilha de São Miguel (Fig. 1).

O Vulcão do Fogo está inserido no Maciço de Água de Pau, uma unidade geomorfológica que ocupa uma área de aproximadamente 150 km². Trata-se de um vulcão central com caldeira, apresentando nos flancos vários cones de escórias, domos e *maars* (*s.l.*). O cume apresenta uma altitude máxima de 947 m e tem uma morfologia complexa, quer pela dinâmica da erosão, quer por sistemas de falhas normais e estruturas de colapso de caldeira/cratera (Wallenstein, 1999). Encontra-se truncado por uma depressão com um diâmetro de aproximadamente 3 km, que é parcialmente ocupada pela Lagoa do Fogo.

A morfologia do maciço encontra-se intensamente sulcada por cursos de água profundamente encaixados, ladeados por vertentes muito inclinadas, normalmente com declives superiores a 50° (Fig. 3b), cuja distribuição e orientação reflectem um nítido controlo estrutural (Wallenstein, 1999).

As principais estruturas tectónicas identificadas no flanco N do vulcão evidenciam direcções dominantes NW-SE e NNW-SSE, bem definidas e materializadas pelos alinhamentos dos cones de escórias, domos e linhas de água (Wallenstein, 1999). Estas direcções são também suportadas por importantes descontinuidades de resistividades geo-eléctricas (Gandino *et al*, 1985). A direcção NNW-SSE limita também o *Graben* da Ribeira Grande, uma importante estrutura tectónica localizada no flanco N do vulcão, que apresenta uma subsidência da ordem dos 650 m (Wallenstein, 1999). Estes sistemas de falhas cruzam a região da caldeira e podem-se observar no flanco S, onde um grupo importante de falhas de direcção N-S é também evidenciado. Um sistema profundo de estruturas E-W está também presente, originado possivelmente ao nível da crosta oceânica. A localização do vulcão está certamente associada à intersecção de várias direcções estruturais, como proposto por distintos autores para outros vulcões centrais nos Açores (*e.g.* Queiroz, 1997). A distribuição circular dos domos traquíticos no topo do vulcão sugere que a instalação dessas estruturas está controlada não somente pelo sistema de falhas regionais, mas também associada à própria evolução do Vulcão do Fogo (Wallenstein, 1999).

A área em estudo é predominantemente constituída por depósitos vulcânicos provenientes do Vulcão do Fogo. Os produtos eruptivos aflorantes são maioritariamente resultantes de erupções de natureza explosiva (cinzas e *lapilli* pomítico) caracterizados por valores baixos de coesão e ângulo de atrito interno (parâmetros resistentes), o que, associado à acentuada inclinação promovida pelo forte encaixe dos cursos de água, faz com que esta área apresente uma elevada susceptibilidade à ocorrência de movimentos de vertente.

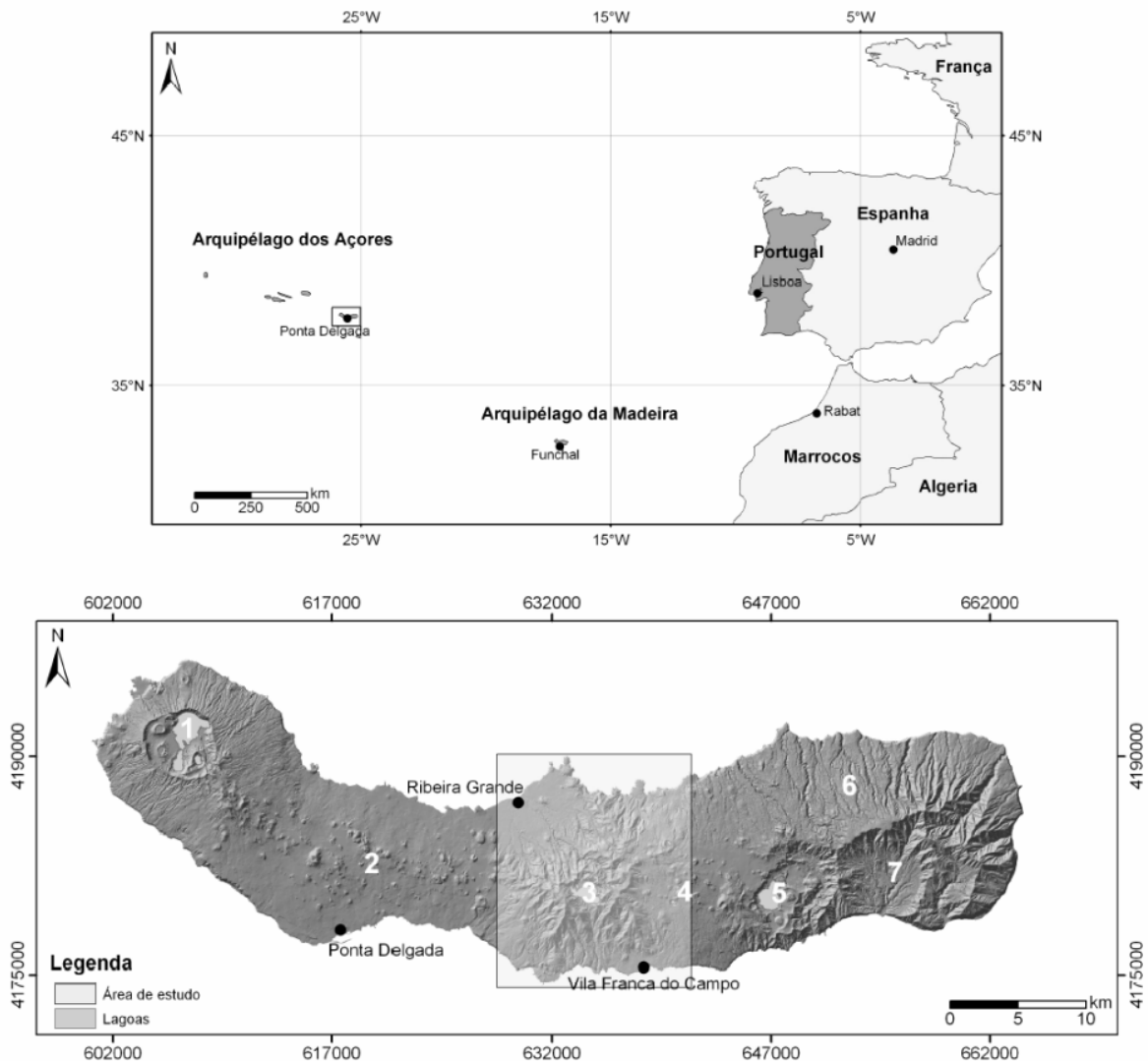


Figura 1 – Localização da área em estudo. Legenda: 1) Vulcão das Sete Cidades; 2) Região dos Picos; 3) Vulcão do Fogo; 4) Achada das Furnas; 5) Vulcão das Furnas; 6) Complexo Vulcânico do Nordeste; 7) Vulcão da Povoação.

Figure 1 – Location of the study area. Legend: 1) Sete Cidades Volcano; 2) Picos Region; 3) Fogo Volcano; 4) Furnas Plateau; 5) Furnas Volcano; 6) Nordeste Volcanic Complex; 7) Povoação Volcano.

3. CARACTERIZAÇÃO DA SISMICIDADE DO ANO DE 2005

Teve início a 10 de Maio de 2005 na ilha de São Miguel uma crise sísmica. A actividade sísmica concentrou-se na região sismogénica do Fogo-Congro, mais precisamente numa zona compreendida entre o flanco E do Vulcão do Fogo e o sector W do Sistema Vulcânico da Achada das Furnas (Fig. 2). No período compreendido entre Maio e Dezembro de 2005 foram registados mais de 46 000 sismos (Fig. 3a), dos quais cerca de 180 foram sentidos pelas populações das freguesias junto à região epicentral.

Esta crise foi caracterizada por períodos de grande actividade, embora em todos os meses (compreendidos entre Maio e Dezembro) o número de eventos registados pelo Sistema de Vigilância Sismológica dos Açores (SIVISA) excedesse em muito os valores da sismicidade que normalmente caracterizam essa área. Durante esse período registaram-se dois picos de excepcional actividade: um coincidente com o mês em que se iniciou a crise e outro no mês de Setembro (Fig. 3a), altura em que

ocorreram os dois sismos mais fortes da crise, nomeadamente no dia 20 e 21, com magnitudes (M_l) 4,1 e 4,3 respectivamente, ambos com intensidades máximas V/VI (MM-56, Escala de Mercalli Modificada). Durante o espaço temporal considerado, a grande maioria dos sismos (aproximadamente 55 %) apresentou magnitudes iguais ou inferiores a 1 (Fig. 3b).

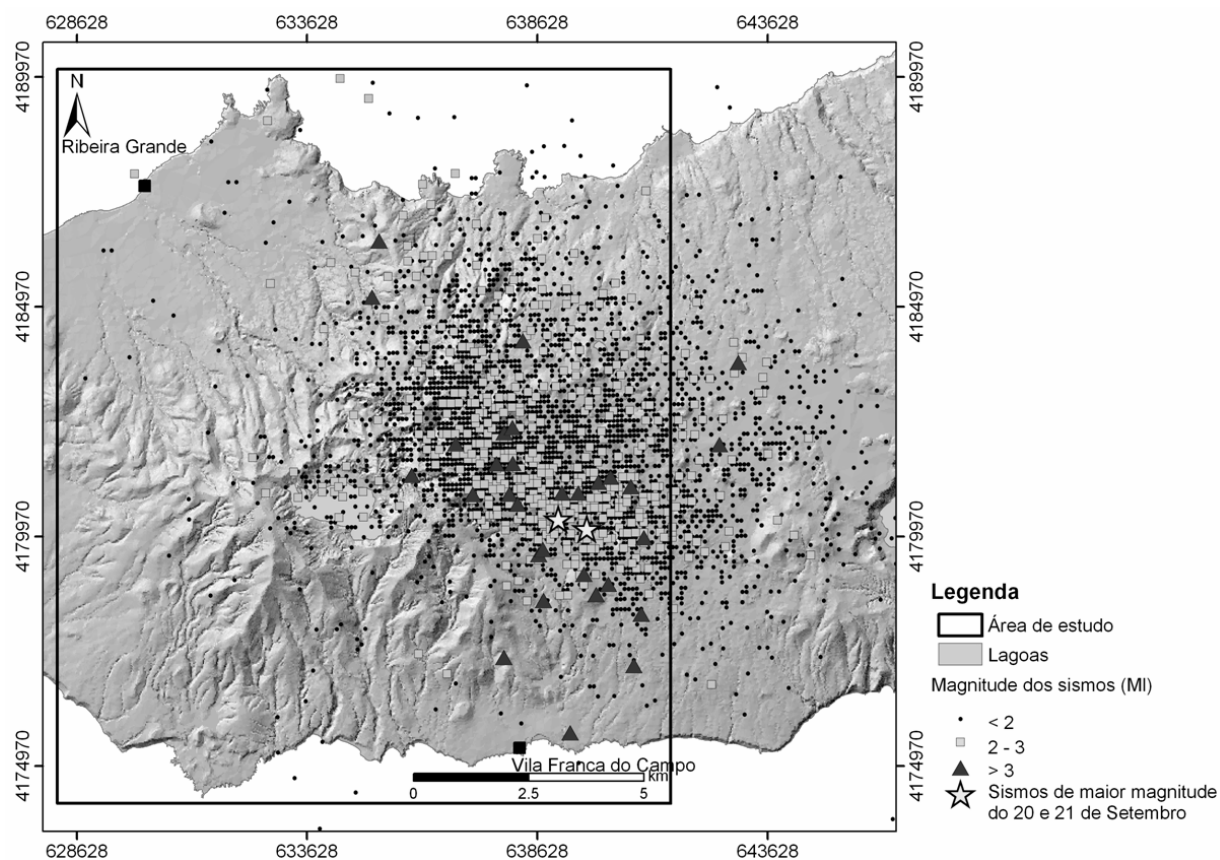


Figura 2 – Localização dos sismos referentes à crise sísmica (dados do SIVISA entre Maio e Dezembro de 2005).

Figure 2 – Seismic crises earthquake location (SIVISA data between May and December 2005).

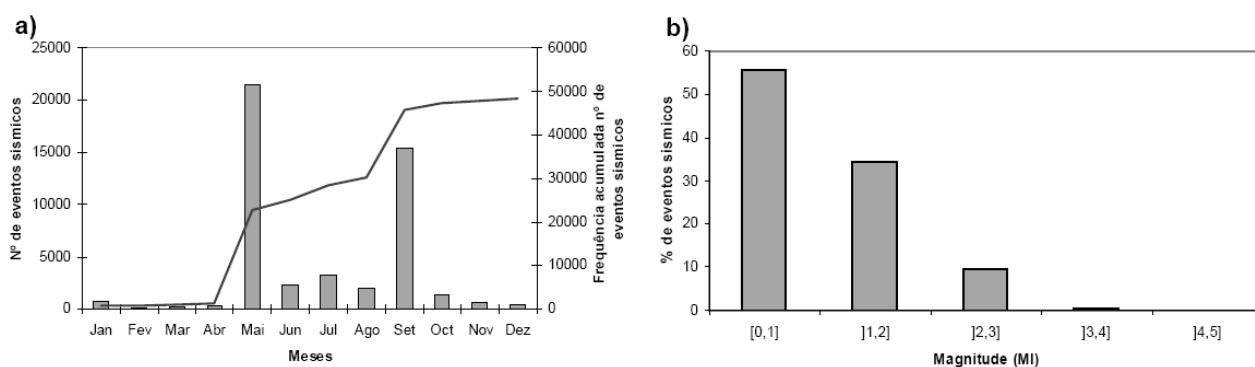


Figura 3 – (a) Frequência mensal de sismos no ano de 2005; (b) Percentagem de sismos relativamente à magnitude para o ano de 2005.

Figure 3 – (a) Monthly earthquake frequency for the year 2005; (b) Earthquake percentage relative to the magnitude for the year 2005.

4. CARACTERIZAÇÃO DA INSTABILIDADE GEOMORFOLÓGICA

Na sequência do desencadeamento de numerosos movimentos de vertente pelos sismos de 20 e 21 de Setembro, o Centro de Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos da Universidade dos Açores (CVARG), realizou diversos trabalhos de campo e integrou uma missão no helicóptero da Força Aérea Portuguesa (FAP), promovida pelo Serviço Regional de Protecção Civil e Bombeiros dos Açores (SRPCBA), tendo como principais objectivos: (1) identificar as zonas mais atingidas pelos movimentos de vertente; (2) cartografar e caracterizar os movimentos de vertente ocorridos e (3) localizar possíveis represas originadas pelos depósitos associados a movimentos de vertente.

Ainda que a magnitude calculada para os sismos não se tenha afastado muito do limiar energético crítico, proposto por Keefer (1984), para a ocorrência de movimentos de vertente desencadeados por sismos, durante os trabalhos de campo foi possível identificar 271 movimentos de vertente, na sua grande maioria do tipo escoada de detritos e deslizamentos translacionais superficiais que rapidamente evoluíram para escoadas detríticas (Fig. 4) não excedendo, na generalidade, a profundidade atingida pelas raízes das árvores de maior porte (1-3 m).



Figura 4 – Aspecto geral dos movimentos de vertente no sector montante da bacia hidrográfica da Ribeira Grande.

Figure 4 – General aspect of the landslides on the Ribeira Grande watershed upper sector.

Verificou-se que os movimentos de vertente se distribuíram de forma heterogénea por uma área de aproximadamente 10 km², alguns dos quais corresponderam a reactivações de taludes anteriormente afectados por este tipo de fenómeno. A grande maioria dos eventos localizou-se em taludes de cursos de água situados nos sectores montante das bacias hidrográficas da Ribeira Seca, da Ribeira Grande e da Ribeira de Água d'Alto (Marques *et al*, 2005).

Adicionalmente, verificou-se pela distribuição espacial dos movimentos de vertente que, ao contrário do que seria espectável, a área afectada não apresentou uma forma circular em torno da fonte energética, mas sim elíptica, alongada segundo uma direcção NW-SE, uma das direcções estruturais principais definidas por Wallenstein (1999) para o Vulcão do Fogo (Fig. 5a). Considerando a mancha de densidades dos sismos localizados no decorrer da crise, identificamos um alinhamento, também ele de direcção NW-SE (Fig. 5b), o que leva a conjecturar que a existência de uma estrutura tectónica com essa direcção, terá de alguma forma condicionado a propagação preferencial da energia sísmica nessa direcção. Essa

estrutura tem expressão ao nível geomorfológico, sendo materializada pela direcção do vale do principal curso de água, no sector montante da Ribeira Grande e pelo alinhamento da Lagoa do Congro e da Lagoa do Arieiro.

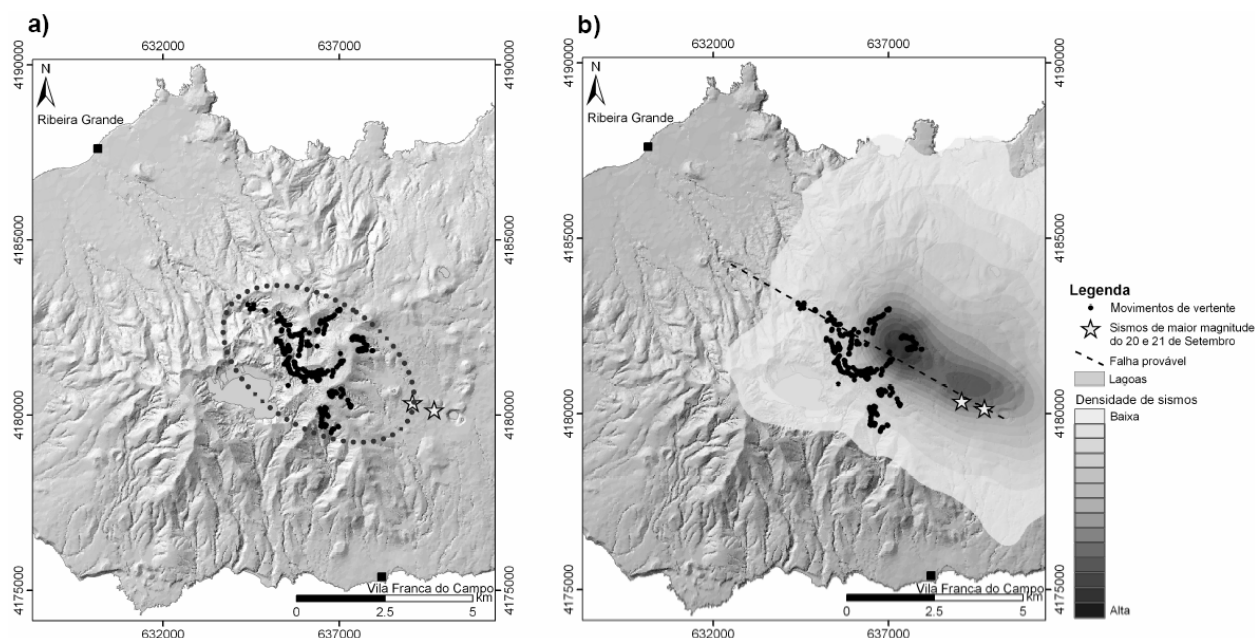


Figura 5 – (a) Distribuição dos movimentos de vertente relativamente aos epicentros de dia 20 e 21 de Setembro; (b) distribuição dos movimentos de vertente relativamente à densidade de sismos da crise.

Figure 5 – (a) Landslide distribution relatively to the 20th and 21st September earthquakes; (b) landslide distribution relatively to the crises earthquake density.

5. CRIAÇÃO DO MAPA DE SUSCEPTIBILIDADE

5.1. Análise das variáveis utilizadas na construção do modelo de susceptibilidade

Para a construção do modelo de susceptibilidade, a distribuição espacial dos movimentos de vertente (MOVERT) foi considerada como variável dependente. Adicionalmente, foram eleitas 4 variáveis independentes, que se admite controlarem a distribuição espacial dos movimentos de vertente: (1) Declive (DEC); (2) Exposição dos taludes (EXP); (3) Litologia (LITO) e; (4) Distância ao epicentro (DISTEPI).

Movimentos de vertente (MOVERT)

Este tema é composto por todos os 271 movimentos de vertente desencadeados pela crise e localizados durante os trabalhos de campo. Os movimentos de vertente foram divididos em dois grupos distintos de forma aleatória: um grupo de estimação (136 casos) e um grupo de validação (135 casos).

Variáveis derivadas do Modelo Digital de Terreno (MDT)

Foi elaborado um MDT tendo por base a altimetria vectorial do IGeoE, à escala 1:25 000 com uma resolução de 10 m. Foram derivados deste MDT dois mapas temáticos da área: o mapa de declives (DEC) e o mapa de exposição dos taludes (EXP). O mapa de declives foi dividido em 13 classes: 0-5°; 5-10°; 10-15°; 15-20°; 20-25°; 25-30°; 30-35°; 35-40°; 40-45°; 45-50°; 50-55°; 55-60°; > 60°. Por sua vez, o mapa da exposição dos taludes foi dividido em 9 classes: áreas planas; N; NE; E; SE; S; SW; W; NW.

Litologia (LITO)

O mapa litológico foi elaborado a partir da transposição da carta geológica de São Miguel elaborada por Zbyszewski *et al* (1958) e Zbyszewski *et al* (1959), à escala 1:50 000. Neste estudo o mapa litológico foi simplificado, para efeitos de modelação, tendo-se apenas utilizado 2 classes: uma classe correspondente a depósitos pomíticos de queda (depósitos não coesivos) e uma classe que engloba escoadas lávicas basálticas (*s.l.*) e traquitos (depósitos coesivos), denominada por “outras unidades litológicas”.

Distância ao epicentro (DISTEPI)

O mapa da distância ao epicentro foi elaborado considerando, de forma conjunta, a distância aos dois eventos de maior magnitude, dos dias 20 e 21 de Setembro de 2005. Este mapa foi dividido em 12 classes: 0-1 km; 1-2 km; 2-3 km; 3-4 km; 4-5 km; 5-6 km; 6-7 km; 7-8 km; 8-9 km; 9-10 km; 10-11 km; 11-12 km.

Todas as variáveis foram reclassificadas de forma numérica e transformadas em *grids*, com um *pixel* de 10x10m, para efeitos de modelação numérica, perfazendo cada mapa temático um total de 2 098 142 *pixels*.

A influência relativa de cada classe, de cada variável, na localização dos movimentos de vertente foi estudada através de análise bivariada, tendo sido calculado para cada classe um *score* de favorabilidade, que traduz a maior ou menor influência de cada variável na distribuição geográfica dos movimentos de vertente (Fig. 6).

Pela análise da figura 6 verifica-se um predomínio dos movimentos de vertente em taludes expostos a NE, E e SE, que na área afectada correspondem a taludes de direcção perpendicular à direcção de propagação da energia sísmica. Deste modo, a preeminência de movimentos de vertente nestes taludes, deverá estar directamente relacionada com a sua exposição relativamente à fonte sísmica, a qual condiciona a sua resposta quando solicitados por um evento sísmico.

A grande maioria dos movimentos de vertente identificados encontra-se em taludes com declives superiores a 50º compostos por depósitos pomíticos, caracterizados por valores baixos dos parâmetros resistentes e, conseqüentemente, por valores reduzidos do factor de segurança. Este facto prende-se com a excedência dos valores de aceleração crítica (valor de aceleração sísmica a partir do qual se dá a instabilidade) nesses locais, provocando uma diminuição do factor de segurança para valores inferiores aos da estabilidade.

Relativamente à distância epicentral, o movimento de vertente mais distal localiza-se a aproximadamente 5 km dos epicentros, coerente com a distância definida por Keefer (1984) para sismos desta magnitude, facto que está directamente relacionado com a atenuação da energia sísmica com o aumento da distância à fonte. Note-se a fraca densidade de movimentos de vertente no quilómetro mais próximo dos epicentros, onde teoricamente seria esperada a maior concentração de eventos. Tal facto é justificado pelos baixos valores de declive existentes no sector em questão.

5.2. Desenvolvimento do modelo de susceptibilidade

Para a criação dos mapas de susceptibilidade foi utilizada a Regressão Logística. Segundo diversos autores (*e.g.* Afifi & Clark, 1998; Atkinson & Massari, 1998; Dai *et al*, 2001; Lee & Min, 2001; Dai & Lee, 2003; Sützen & Doyuran, 2003; Ayalew & Yamagishi, 2005) este representa o melhor método de análise

estatística multivariada quando se pretende estudar a relação entre um conjunto de variáveis independentes (LITO, EXP, DEC, DISTEPI) e uma variável dependente dicotómica (MOVERT).

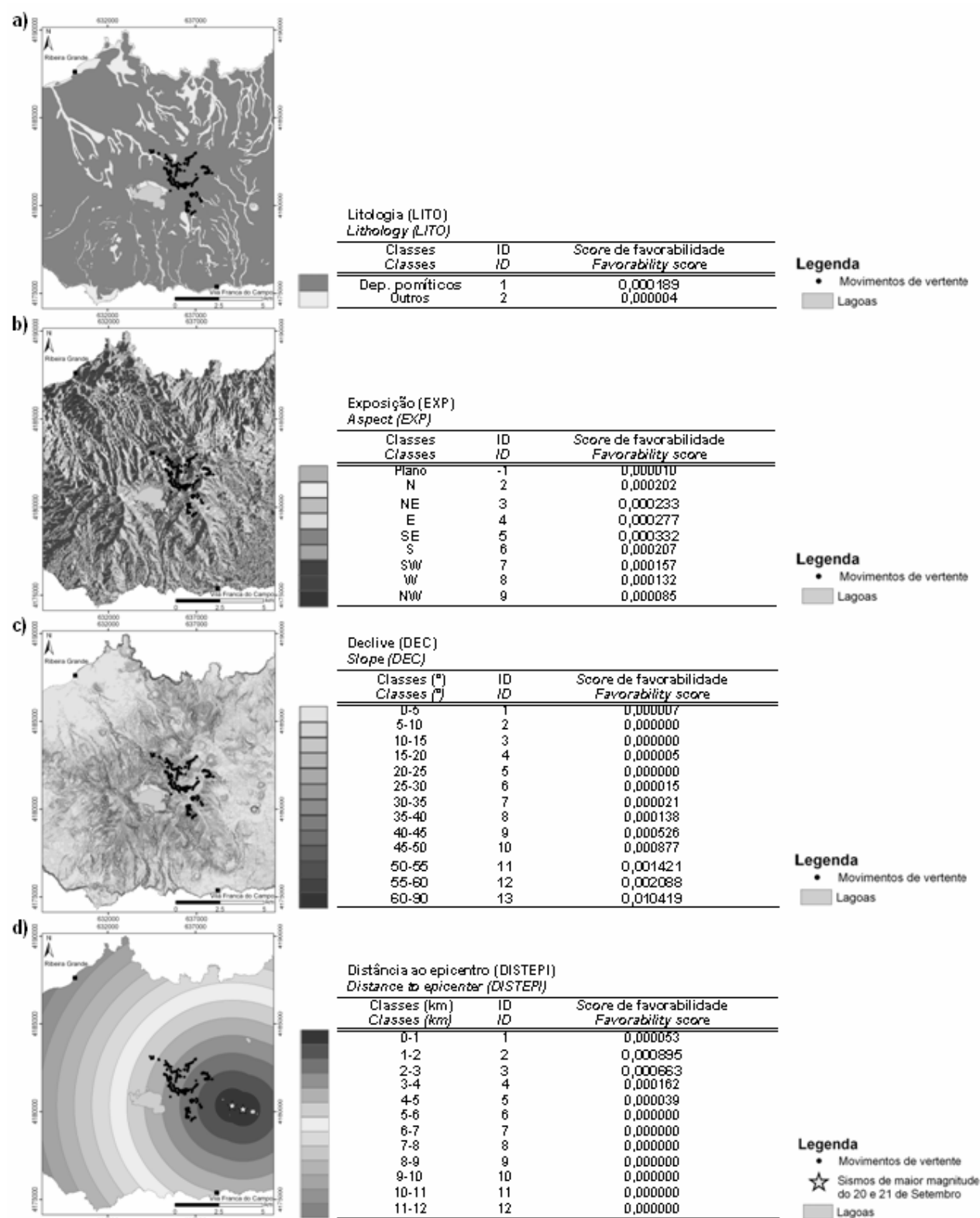


Figura 6 – Resultados da análise bivariada para as diferentes variáveis condicionantes. a) Litologia (LITO); b) Exposição (EXP); c) Declives (DEC); d) Distância ao epicentro (DISTEPI).

Figure 6 – Bivariate analyses results for the different conditioning variables.

Neste tipo de análise regressiva, a relação entre as variáveis independentes e a variável dependente não é linear mas curvilínea. A relação entre a ocorrência de movimentos numa unidade de terreno e a sua dependência relativamente ao conjunto de factores condicionantes é expressa através da equação 1:

$$P = \left[\frac{1}{(1 + e^{-Z})} \right] \quad (\text{Eq. 1})$$

onde: P é a probabilidade da unidade de terreno (*pixel* no caso em estudo) pertencer ao grupo estável ou instável, variando entre 0 e 1 numa curva assintótica (com forma de S); Z é o modelo linear logístico descrito pela equação 2, variando entre $+\infty$ e $-\infty$:

$$Z = \beta_0 + \beta_1 X_1(r) + \beta_2 X_2(r) + \dots + \beta_n X_n(r) + \varepsilon \quad (\text{Eq. 2})$$

onde: $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_n$ - são os parâmetros do modelo de regressão logística; $v_1(r), v_2(r), \dots, v_n(r)$ são as variáveis independentes em cada unidade cartográfica; e ε - é o erro associado à aproximação curvilínea do modelo. Obtemos desta forma um modelo linear que traduz o melhor ajuste relativamente à presença ou inexistência de movimentos de vertente com as variáveis independentes (LITO, EXP, DEC, DISTEPI).

5.3. Resultados e discussão do modelo de susceptibilidade

Para a construção do modelo de susceptibilidade, tal como referido anteriormente, a população de movimentos de vertente foi dividida em dois grupos: um grupo de estimação – utilizado para a estruturação do modelo de susceptibilidade e um grupo de validação – que como o nome indica, foi utilizado para posteriormente testar a taxa de predição do modelo construído. Foram produzidos três modelos de susceptibilidade distintos que, por sua vez, se traduzem por três mapas de susceptibilidade: (1) utilizando as variáveis independentes DEC e EXP (não ilustrado); (2) utilizando as variáveis independentes DEC, EXP e LITO (Fig. 7); (3) utilizando as variáveis independentes DEC, EXP e LITO e DISTEPI (Fig. 8).

Os modelos retratados nas figuras 7 e 8 foram produzidos unicamente com os movimentos de vertente do grupo de estimação. O cruzamento dos mapas assim produzidos com os movimentos do grupo de validação (não utilizados na construção dos modelos), através do método da correlação cruzada (Zêzere *et al*, 2004), permitiu a construção das taxas de predição para cada um dos modelos de susceptibilidade (Fig. 9). Constata-se que as taxas de predição são extremamente elevadas, aumentando com a adição de variáveis independentes ao modelo.

Assumindo a capacidade preditiva dos mapas de susceptibilidade, conclui-se que num cenário hipotético de instabilidade geomorfológica desencadeada por um sismo de magnitude 4,3 sem uma localização epicentral pré-definida, 92,6 % dos movimentos de vertente irão ocorrer nos 3,5 % de área classificada como mais susceptível, no mapa gerado sem a variável distância ao epicentro (Fig. 7). Conhecida a localização do epicentro do sismo, o modelo do mapa de susceptibilidade é refinado. Deste modo, adicionando a variável distância ao epicentro ao algoritmo do mapa de susceptibilidade anterior, o que indirectamente corresponde à atenuação da aceleração sísmica com a distância à fonte, aumentou-se a taxa de predição para 96,3 % nos 1,7 % de área classificada como mais susceptível.

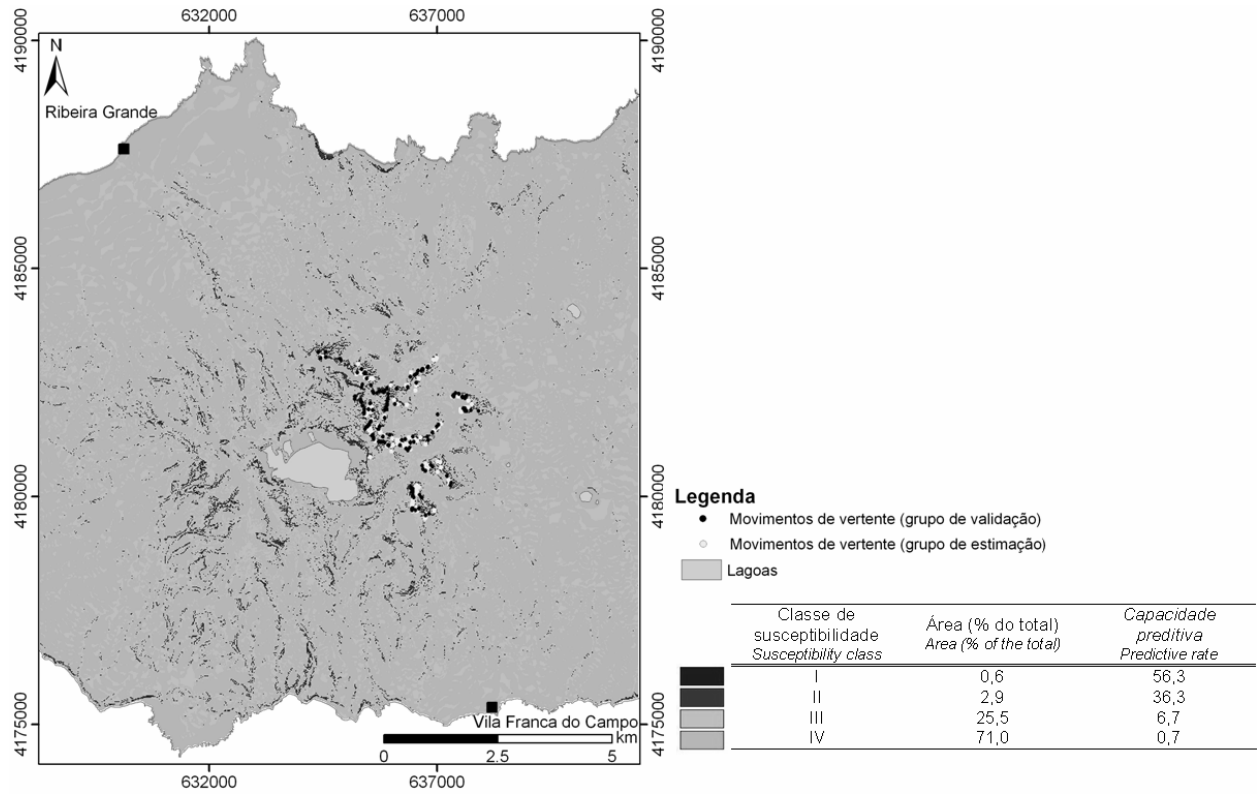


Figura 7 – Resultados do modelo de susceptibilidade utilizando as variáveis LITO, EXP e DEC.

Figure 7 – Susceptibility model result using the variables LITO, EXP and DEC.

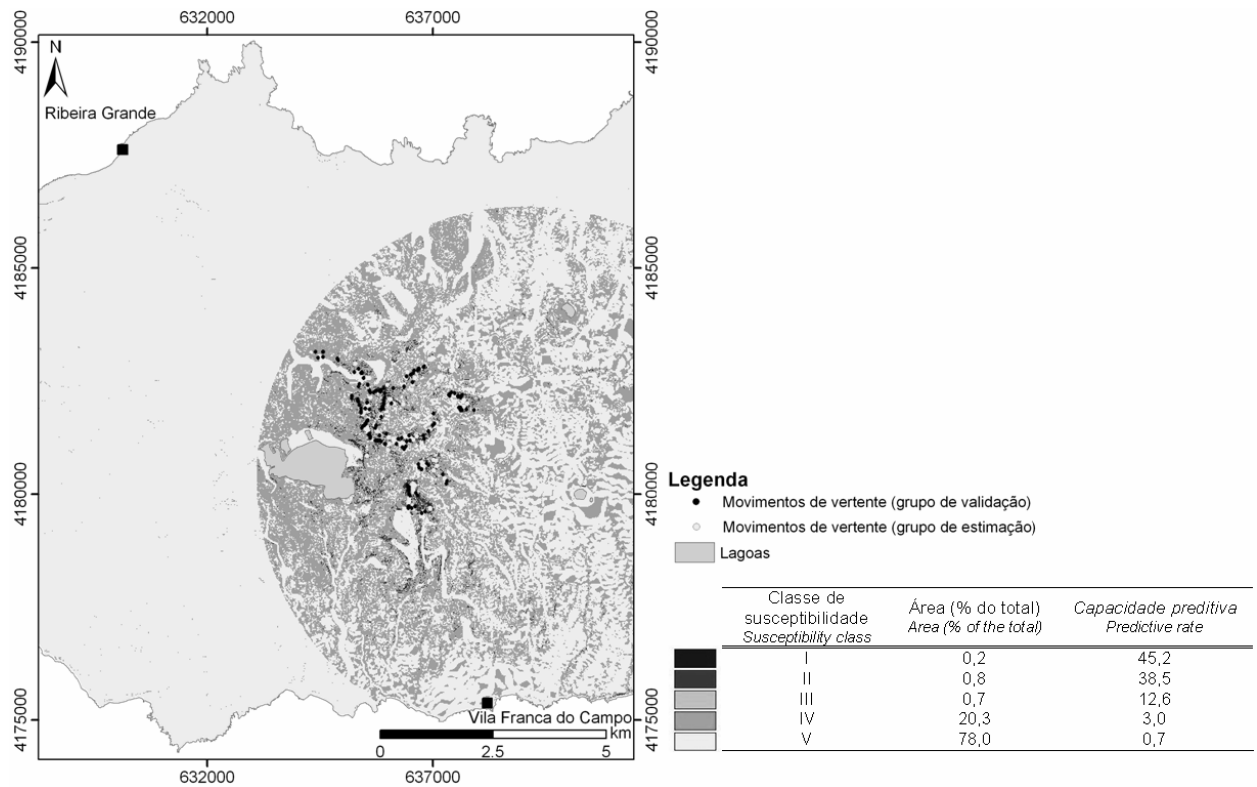


Figura 8 – Resultados do modelo de susceptibilidade utilizando as variáveis LITO, EXP, DEC e DISTEPI.

Figure 8 – Susceptibility model result using the variables LITO, EXP, DEC and DISTEPI.

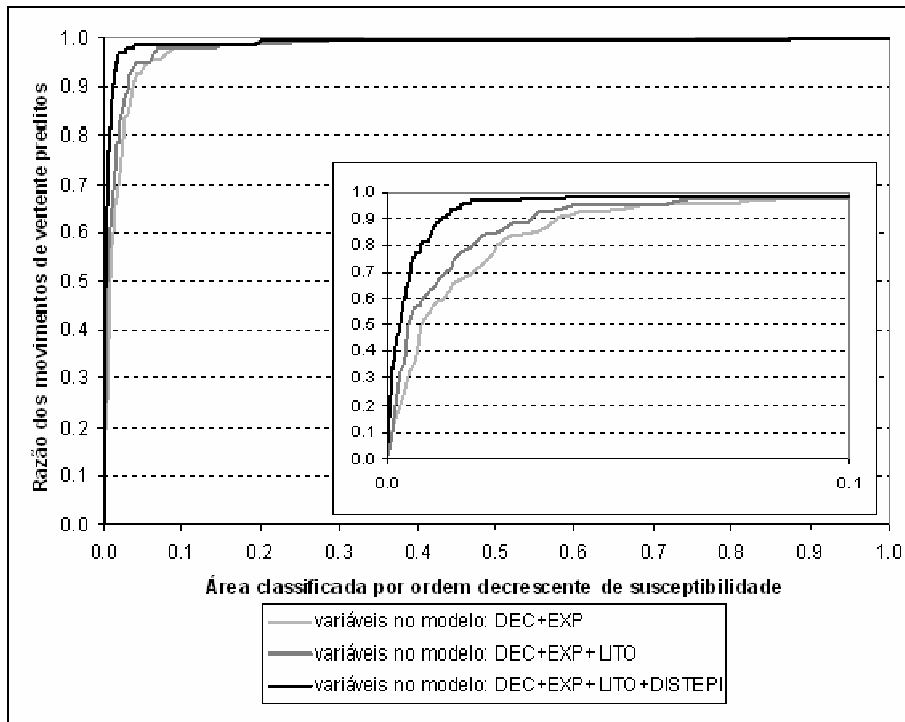


Figura 9 – Taxa de predição dos modelos de susceptibilidade.

Figure 9 – Susceptibility models prediction rates.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os sismos registados nos dias 20 e 21 de Setembro provocaram uma quantidade apreciável de movimentos de vertente, constituindo desta forma um caso de estudo importante no que concerne à caracterização da instabilidade geomorfológica desencadeada pela sismicidade no arquipélago dos Açores. Este acontecimento possibilitou, não só a análise da relação entre sismos e movimentos de vertente no que respeita a danos directos, mas também o estudo do efeito de variáveis *quasi* estáticas (DEC, EXP, LITO, DITEPI, consideradas neste trabalho) na sua distribuição espacial.

Os movimentos de vertente desencadeados por estes sismos apresentam uma homogeneidade morfométrica muito elevada, que decorre do facto de estarem associados a um único factor desencadeante muito selectivo, no que concerne à relação entre a aceleração sísmica num determinado local e as classes de declive solicitadas relativamente aos diferentes tipos de materiais que compõem os taludes. Este facto ajuda, naturalmente, a explicar os bons resultados dos modelos de susceptibilidade.

O elevado potencial preditivo dos modelos de susceptibilidade gerados deverá ser confirmado pela ocorrência de eventos futuros similares na mesma área, que permitam uma partição temporal da base de dados dos movimentos de vertente. De igual modo, os modelos de susceptibilidade deverão ser testados, no futuro, utilizando outras séries de dados de movimentos de vertente desencadeados por sismos nos Açores, com diferentes localizações e magnitudes (e.g. Faial 1998 – $M_L=5,6$), pois destes parâmetros dependerá, em muito, a resposta das variáveis consideradas como independentes neste trabalho e, por sua vez, a distribuição espacial dos movimentos de vertente.

Ao longo da história ocorreram episódios de instabilidade geomorfológica desencadeados pela sismicidade no Vulcão do Fogo. Exemplo disso é o caso de 22 de Outubro de 1522, quando um sismo de

intensidade X (EMS-98, *European Macroseismic Scale*), localizado no flanco SE do vulcão (Silveira 2002; Silveira *et al*, 2003) desencadeou numerosos movimentos de vertente um pouco por toda a ilha (Fructuoso, 1522-1591†). Um desses movimentos de vertente, do tipo escoada de detritos, com um volume de material envolvido estimado em $6,75 \times 10^6 \text{ m}^3$, cobriu uma área aproximada de $4,5 \text{ km}^2$ (Marques, 2004). Estima-se que tenham perecido cerca de 5000 pessoas neste episódio e Vila Franca do Campo, então capital dos Açores, foi completamente destruída (Fructuoso, 1522-1591†). Os elevados valores de sismicidade registados para o Vulcão do Fogo, considerado uma das regiões sismogénicas mais activas do arquipélago dos Açores (Gaspar, *et al*, 2003; Silva, 2004), associado aos baixos valores dos parâmetros resistentes dos materiais que o compõe, torna esta área particularmente susceptível à ocorrência de movimentos de vertente.

O tipo de abordagem desenvolvido neste trabalho, pelo seu dinamismo e exactidão, revelou ser uma excelente ferramenta para a predição de áreas susceptíveis à ocorrência de movimentos de vertente e deverá ser integrada no âmbito do ordenamento do território e do planeamento da emergência. No entanto, os modelos de susceptibilidade “apenas” resolvem o problema da identificação dos locais de desencadeamento das futuras instabilidades. Para a análise da perigosidade e da vulnerabilidade será necessário, no futuro, avaliar a probabilidade temporal de ocorrência de movimentos de vertente e modelar a sua propagação.

BIBLIOGRAFIA

- Afifi, A. A. & Clark, V. (1998) – *Computer aided multivariate analysis*. Chapman Hall, London, 455p.
- Aleotti, P. & Chowdhury, R. (1999) – Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bull. Eng. Geol. Env.*, 58: 21-44.
- Atkinson, P. M. & Massari, R. (1998) – Generalized linear modeling of susceptibility to landsliding in the central Apennines, Italy. *Computers and Geosciences*, 24 (4): 373-385.
- Ayalew, L. & Yamagishi, H. (2005) – The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda – Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology*, 65: 15-31.
- Begueria, S. & Lorente, A. (1999) – Landslide hazard mapping by multivariate statistics; comparison of methods and case study in the Spanish Pyrenees. The Damocles Project Work, Contract No EVG1-CT 1999-00007. Technical Report, 20p.
- Bonham-Carter, G. F. (1996) – *Geographic information systems for geoscientists, modeling with GIS*. Pergamon Press, Oxford, 398p.
- Carrara, A. (1983) – Multivariate models for landslide hazard evaluation. *Mathematical Geology*, 15 (3): 403-427.
- Carrara, A. (1988) – Landslide hazard mapping by statistical methods: a “Black Box” approach. *In Workshop on natural disaster in European Mediterranean countries, Perugia, Italy*, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Perugia, p. 205-224.
- Carrara, A.; Cardinali, M.; Detti, R.; Guzzetti, F.; Pasqui, V.; Reichenbach, P. (1990) – Geographical information systems and multivariate models in landslide hazard evaluation. *In ALPS 90 Alpine Landslide Practical Seminar*, Sixth International Conference and Field Workshop on Landslides, Aug 31-Sept 12, Milan, Italy, Università degli Studi de Milano, p. 17-28.
- Carrara, A.; Cardinali, M.; Detti, R.; Guzzetti, F.; Pasqui, V.; Reichenbach, P. (1991) – GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard. *Earth Surf. Proc. Land.*, 16 (5): 427-445.
- Carrara, A.; Cardinali, M.; Guzzetti, F. (1992) – Uncertainty in assessing landslide hazard and risk. *ITC J.*, 2: 172-183.
- Carrara, A.; Cardinali, M.; Guzzetti, F.; Reichenbach, P. (1995) – GIS technology in mapping landslide hazard. *In Carrara, A. & Guzzetti, F. (Eds.) – Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*. Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, p. 135-176.

- Dai, F. C.; Lee, C. F.; Xu, Z. W. (2001) – Assessment of landslide susceptibility on the natural terrain of Lantau Island. *Hong Kong Environ. Geol.*, 40 (3): 381-391.
- Dai, F. C. & Lee, C. F. (2003) – A Spatiotemporal probabilistic modeling of storm-induced shallow landsliding using aerial photographs and logistic regression. *Earth Surf. Process. Landforms*, 28: 527-545.
- Frutuoso, G. (1522-1591†) – Livro Quarto das Saudades da Terra. In Frutuoso, G. (1981) – *Saudades da Terra*. 2ª Edição, Ponta Delgada, Instituto Cultural de Ponta Delgada.
- Gaspar, J. L.; Queiroz, G.; Ferreira, T. (2003) – *Risco sismovulcânico associado ao graben da Ribeira Grande (Ilha de S. Miguel)*. DTC 14/CVARG/03.
- Gandino, A.; Guidi, M.; Merlo, C.; Mete, L.; Rossi, R.; Zan, L. (1985) – Preliminary model of the Ribeira Grande geothermal field (Azores Islands). *Geothermics*, 14(1): 91-105.
- 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. *Geomorphology*, 31: 181-216.
- Guzzetti, F.; Reichenbach, P.; Cardinali, M.; Galli, M.; Ardizzone, F. (2005) – Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale. *Geomorphology*, 72: 272-299.
- Hansen, A. (1984) – Landslide hazard analysis. In Brunsten, D. & Prior, D. B. (Eds.) – *Slope Instability*. Chichester, John Wiley & Sons, p. 523-602
- Hutchinson, J. N. (1995) – Landslide hazard assessment, keynote paper. In Bell (Ed.) – *Landslides, Proceedings of the 6th International Symposium on Landslides*, Rotterdam, Balkema, p. 1805-1841
- Keefer, D. (1984) – Landslides caused by earthquakes. *Geological Society of America Bulletin*, 95: 406-421.
- Kobashi, S. & Suzuki, M. (1988) – Hazard index for the judgment of slope stability in the Rokko Mountain region. In *Proc INTERPRAEVENT*, Graz, Austria, 1: 223-233.
- Lee, S. & Min, K. (2001) – Statistical analysis of landslide susceptibility at Yongin, Korea. *Environ. Geol.*, 40: 1095-1113.
- Marques, R. (2004) – *Contribuição para o conhecimento da instabilidade geomorfológica nos Açores: Estudo de movimentos de vertente associados a diferentes mecanismos desencadeantes*. Tese de Mestrado em Vulcanologia e Riscos Geológicos, Dep. de Geociências, Univ. dos Açores, 145p.
- Marques, R.; Coutinho, R.; Queiroz, G. (2005) – *Considerações sobre a ocorrência dos movimentos de vertente desencadeados pelos sismos de 20 e 21 de Setembro de 2005 no Fogo-Congro (Ilha de São Miguel)*. Caracterização e análise de cenários. Relatório Técnico-Científico 27/CVARG/05, Centro de Vulcanologia, 36p.
- Queiroz, G. (1997) – *Vulcão das Sete Cidades (S. Miguel, Açores): história eruptiva e avaliação do hazard*. Tese de Doutoramento no ramo de Geologia, especialidade de Vulcanologia. Universidade dos Açores, Departamento de Geociências, 226p.
- Silva, R. (2004) – *Características da sismicidade na região central da Ilha de São Miguel (Açores): identificação e análise de famílias sísmicas*. Tese de Mestrado em Vulcanologia e Riscos Geológicos, Dep. de Geociências, Univ. dos Açores, 136p.
- Silveira, D. (2002) – *Caracterização da sismicidade histórica da ilha de S. Miguel com base na reinterpretação de dados de macrossísmica: contribuição para a avaliação do risco sísmico*. Tese de Mestrado em Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos, Dep. de Geociências, Univ. dos Açores, 149p.
- Silveira, D.; Gaspar, J. L.; Ferreira, T.; Queiroz, G. (2003) – Reassessment of the historical seismic activity with major impact on S. Miguel Island (Azores), *Natural Hazards and Earth System Science*, 3: 615-623.
- Spiegelhalter, D. J. (1986) – Uncertainty in expert systems, in artificial intelligence and statistics. Addison Wesley, Reading, MA, p. 17-55.
- Soeters, R. & van Westen, C. J. (1996) – Slope Instability Recognition, Analysis and Zonation. In Turner, A. K. & Schuster, R. L. (Eds.) – *Landslides. Investigation and Mitigation*. Transportation Research Board, Washington D.C., National Academy Press, Special Report 247: 129-177.
- Süzen, M. L. & Doyuran, V. (2003) – A comparison of the GIS based landslide susceptibility assessment methods: multivariate versus bivariate. *Environ. Geology*, 45: 665-679.

- Vanacker, V.; Vanderschraeghe, M.; Govers, G.; Willems, E.; Poesen, J.; Deckers, J.; De Bievre, B. (2003) – Linking hydrological, infinite slope stability and land-use change models through GIS for assessing the impact of deforestation on slope stability in high Andes watersheds. *Geomorphology*, 52: 299-315.
- Wallenstein, N. (1999) – *Estudo da história eruptiva recente e do comportamento eruptivo do vulcão do Fogo (S. Miguel, Açores). Avaliação preliminar do hazard*. Tese de Doutoramento no ramo de Geologia, especialidade de Vulcanologia, Univ. dos Açores, Dep. Geociências, 266p.
- Yin, K. L. & Yan, T. Z. (1988) – Statistical prediction model for slope instability of metamorphosed rocks. In Bonnard, C. (Ed.) – *Proc. 5th Int. Symp. Landslides*, Lausanne. Balkema, Rotterdam, 2: 1269-1272.
- Zbyszewski, G.; Moutinho d'Almeida, F.; Veiga Ferreira, O.; Torre Assunção, C. (1958) – Carta geológica de Portugal na escala de 1:50 000. São Miguel (Açores) – Folha B. Serviços Geológicos de Portugal. Lisboa.
- Zbyszewski, G.; Veiga Ferreira, O.; Torre Assunção, C. (1959) – Carta geológica de Portugal na escala de 1:50 000. São Miguel (Açores) – Folha A. Serviços Geológicos de Portugal. Lisboa.
- 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: 73-82.
- Zêzere, J. L.; Reis, E.; Garcia, R.; Oliveira, S.; Rodrigues, M. L.; Vieira, G.; Ferreira, A. B. (2004) – Integration of spatial and temporal data for the definition of different landslide hazard scenarios in the area north of Lisbon (Portugal). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4: 133-146.