

Desenvolvimento de um Sistema Empírico de Alerta para Movimentos de Vertente (ELEWS-Pov) através da aplicação da Distribuição Generalizada dos Valores Extremos (dGVE) na determinação de limiares de precipitação no concelho da Povoação (ilha de S. Miguel, Açores)

Empirical Landslides Early-Warning System (ELEWS-Pov) development for the Povoação county (S. Miguel island, Azores) based on the application of the Generalized Extreme Values distribution (GEVd) for rainfall-triggering thresholds assessment

R. Marques¹, J.L. Zêzere², P. Amaral¹, J.L. Gaspar¹, G. Queiroz¹

¹Centro de Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos, Universidade dos Açores, 777, 1200-540 Ponta Delgada, Açores-Portugal. E-mail: rui.tf.marques@azores.gov.pt

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

Abstract

For the development of the Empirical Landslide Early-Warning System to Povoação County (ELEWS-Pov), the role of rainfall on landslide activity was analysed. The process comprised the reconstruction of absolute rainfall for different rainfall durations ($D=[1,90] \in \mathbb{R}$) associated with each one of the 55 landslide events identified from 1976/77 to 2007/08. The critical rainfall combination Intensity(I)-Duration(D) responsible for each landslide event was assessed using the Generalised Extreme Values distribution (GEVd). For the distribution parameters estimation it was used the Maximum Likelihood (ML) method. Landslide events in the study area are ruled by the function $I(D)=136,86 D^{-0,556}$ ($R^2=0,94$). For $D \neq 1$, I values underestimate the rainfall registered on the day of the event (P_{D1}) increasing this bias with $D \rightarrow 90$. To overturn this bias it was calculated the correlation function between D and P_{D1} given by $P_{D1}(D)=131,81 D^{-0,143}$. Rainfall-triggered landslides threshold was defined using the best boundary function (BF) between landslide events and non landslide events that result in the highest ratio between true landslide events truly predicted and false positives for both $I-D$ and $P_{D1}-D$ correlations. For $I-D$ and $P_{D1}-D$ correlations the BF functions correspond to $BFI(D)=61,93 D^{-0,4643}$ and $BFP_{D1}(D)=61,93 D^{-0,0582}$, respectively. The alert and the alarm of the ELEWS-Pov are activated for a specific date $dx(I(D); P_{D1})$ when the rainfall threshold conjunction $dx(I(D)) \geq BFI(D) \wedge dx(P_{D1}) \geq BFP_{D1}(D)-c$ is satisfied using $c=0$ to the alarm and $c=10$ for the alert. The threshold conjunction was normalized by the mean annual precipitation (MAP) and applied to 1 meteorological stations and 4 other rain gauges located at Povoação County. All the calculation processes were automated in MATLAB language, for update the functions at the end of each year or at each new landslide event, giving a dynamic behaviour to the rainfall threshold conjunction. A JAVA application was developed to read real-time rainfall data and automatically calculate if the alarm or the alert conjunctions are satisfied, sending alert and alarm messages by e-mail and SMS.

Keywords

Early-warning System, Rainfall Thresholds, Landslides, GEVd, Povoação county, Azores

Resumo

Para o desenvolvimento do Sistema de Alerta Empírico para Movimentos de Vertente no concelho da Povoação (ELEWS-Pov) foi estudado o papel da precipitação no desencadeamento de movimentos de vertente nesse concelho. Este processo contemplou a reconstrução da precipitação acumulada absoluta para diferentes durações ($D=[1,90] \in \mathbb{R}$) associada com cada um dos 55 eventos identificados entre os anos climatológicos de 1976/77 e 2007/08.

A combinação crítica Intensidade(I)-Duração(D) responsável por cada um dos eventos foi definida utilizando a distribuição Generalizada dos Valores Extremos (dGVE). Para estimar os parâmetros da distribuição foi utilizado o método da Máxima Verosimilhança (MV). Verificou-se que a ocorrência de eventos de instabilidade geomorfológica se rege pela função $I(D)=136,86 D^{-0,556}$ ($R^2=0,94$). Para valores de $D \neq 1$, os valores de I subestimam a precipitação registada no dia do evento (P_{D1}) agravando-se este problema com $D \rightarrow 90$. Para contornar este

problema foi definida uma função entre P_{D1} e D dada por $P_{D1}(D)=131,81 D^{-0,143}$. O limiar de precipitação para o desencadeamento de movimentos de vertente foi definido utilizando as funções de fronteira (BF) dos eventos de instabilidade geomorfológica para ambas as correlações $I-D$ e $P_{D1}-D$, cujos resultados representem a maior razão entre eventos correctamente preditos e falsos positivos. Para as correlações $I-D$ e $P_{D1}-D$ as funções BF correspondem a $BFI(D)=61,93 D^{-0,4643}$ e $BFP_{D1}(D)=61,93 D^{-0,0582}$, respectivamente.

O alerta e o alarme do sistema são activados para uma determinada data $dx(I(D); P_{D1})$ quando a conjunção do limiar de precipitação $dx(I(D)) \geq BFI(D) \wedge dx(P_{D1}) \geq BFP_{D1}(D)-c$ é satisfeita, utilizando $c=0$ para o alarme e $c=10$ para o alerta. A conjunção do limiar de precipitação foi normalizada pela precipitação média anual (PMA) e aplicada a 1 estação meteorológica e 4 postos udométricos localizados no concelho. Todos os processos de cálculo foram automatizados em MATLAB, por forma a actualizar todas as funções a cada novo ano de dados ou a cada novo evento de instabilidade geomorfológica, dando um carácter dinâmico à conjunção do limiar de precipitação. Os alarmes e alertas são enviados por e-mail e SMS por uma aplicação desenvolvida em JAVA que lê os dados de precipitação em tempo real e automaticamente verifica se a conjunção de alarme ou alerta é satisfeita.

Palavras-Chave

Sistema de alerta, Limiares de precipitação, Movimentos de vertente, dGVE, Concelho da Povoação, Açores

1. Introdução

A precipitação é um dos factores desencadeantes de instabilidade geomorfológica mais importantes no nosso planeta. Desde há muito tempo que os investigadores se preocupam em determinar quantitativamente a precipitação necessária para o desencadeamento deste tipo de fenómenos, a diversas escalas, devido não só ao interesse científico sobre a temática, mas também, com o objectivo de desenvolver sistemas de alerta e alarme, para mitigar o impacte deste perigo sobre o Homem e a sociedade.

Os limiares de precipitação podem ser definidos tendo por base modelos físicos (conceptuais e baseados no funcionamento dos processos físicos envolvidos) e modelos empíricos (com base na análise estatística/probabilística de casos passados) como o que se apresenta neste trabalho.

Revisões da literatura sobre esta temática (e.g. Wieczoreck e Glade, 2005; Guzzetti *et al.*, 2007) têm demonstrado que não existem limiares de precipitação universais para o desencadeamento de movimentos de vertente. Os limiares de precipitação podem ser definidos a diversas escalas, sendo os regionais normalmente definidos para zonas com um enquadramento climático, meteorológico e fisiográfico específico, e áreas que não excedem algumas centenas de quilómetros quadrados, sendo estes os limiares mais apropriados para a definição de sistemas de alerta e de alarme. Neste contexto, importa no entanto sublinhar que a aplicação de tais limiares se restringe às áreas para as quais são desenvolvidos por reflectirem intrinsecamente as suas características (Crosta, 1989).

Este trabalho dá continuidade à investigação iniciada por Marques *et al.* (2008) e visa a apresentação de um sistema de alerta e alarme denominado por ELEWS-Pov (*Empirical Landslide Early Warning System - Povoação*), que se baseia na definição de um limiar empírico de precipitação responsável pela ocorrência de eventos de instabilidade geomorfológica no concelho da Povoação, a partir do qual os alertas e alarmes são definidos.

2. Enquadramento geral da área de estudo

A área de estudo corresponde ao Concelho da Povoação, localizado no sector SE da ilha de S. Miguel, do arquipélago dos Açores (Fig. 1). Trata-se de um concelho com uma área aproximada de 116 km² onde residem 6726 habitantes (CENSUS, 2001), que abrange os vulcões poligenéticos com caldeira das Furnas e da Povoação.

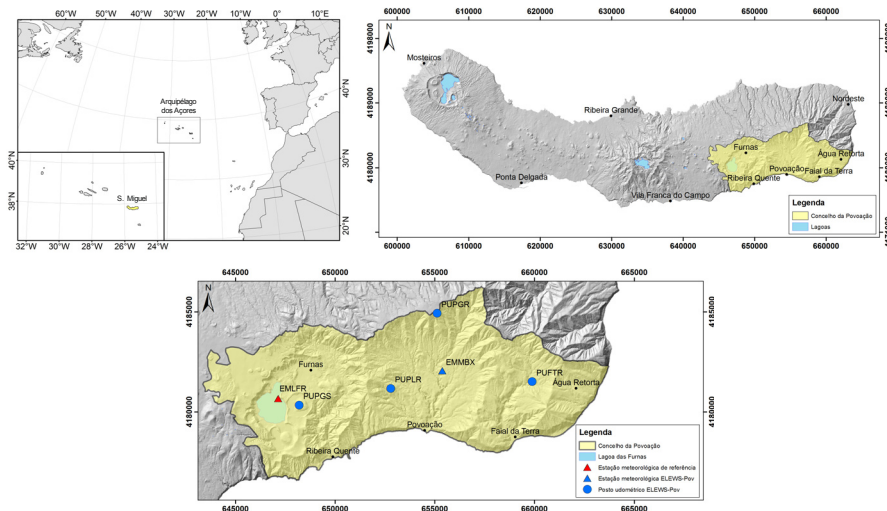


Figura 1. Enquadramento geográfico do concelho da Povoação (S. Miguel, Açores), localização da estação meteorológica de referência e da estação meteorológica e postos udométricos que compõem o ELEWS-Pov.

Os produtos eruptivos aflorantes, sobretudo resultantes de erupções explosivas (*e.g.* cinzas e *lapilli* pomíticos), de natureza muito friável, maioritariamente provenientes de erupções no Vulcão das Furnas, associados à acentuada inclinação das vertentes, fazem com que esta área seja muito regularmente afectada por episódios de instabilidade geomorfológica.

Desde 1900 contabilizaram-se no concelho 41 mortes provocadas por eventos de instabilidade geomorfológica desencadeada por precipitação, tendo o mais gravoso neste período ocorrido a 31 de Outubro de 1997 e sido responsável pela morte de 29 pessoas.

3. Metodologia

Para a definição do limiar de precipitação responsável pela ocorrência de movimentos de vertente no concelho da Povoação, foi feita a reconstrução da actividade geomorfológica entre os anos climatológicos de 1976/77 e 2007/08, com base essencialmente em jornais regionais e locais, mas também recorrendo a relatórios técnico-científicos, teses, livros e a testemunhos locais. Deste modo, foi possível identificar 55 eventos de instabilidade geomorfológica para o período de referência, na área em estudo.

Com base nos dados diários de precipitação acumulada absoluta para diferentes durações de precipitação ($D=[1,90] \in \mathbb{R}$) que antecederam cada um dos episódios de instabilidade geomorfológica, calculou-se o período de retorno (PR) e a probabilidade de excedência, utilizando-se para tal a distribuição Generalizada de Valores Extremos (dGVE). Para o cálculo dos 3 parâmetros da dGVE, para cada um dos valores de D considerados foi utilizado o método da máxima verosimilhança.

Para cada evento de instabilidade foi escolhido o par intensidade (I)-duração (D) com maior período de retorno. Deste modo foram seleccionados os períodos de precipitação mais raros (mais extremos) para cada evento, fazendo-se uma discriminação máxima entre períodos de precipitação caracterizados por instabilidade geomorfológica e períodos de precipitação não relacionados com a instabilidade à semelhança do critério utilizado por Zêzere *et al.* (2005), Marques *et al.* (2008) e Pereira *et al.* (2009).

Com base no par I - D de cada um dos eventos traçou-se uma função envolvente $BFI(D)$ correspondente à melhor discriminação entre dias em que se registou instabilidade geomorfológica e dias em que não houve instabilidade, fazendo variar os parâmetros da função da envolvente, de forma a obter o valor mais elevado resultante da razão entre eventos correctamente preditos e falsos positivos. Para valores de $D \neq 1$, os valores de I subestimam a precipitação registada no dia do evento (P_{D1}), agravando-se este problema com $D \rightarrow 90$. Para contornar este problema foi definida uma função entre P_{D1} e D , traçando-se

para estes pares, igualmente, a envolvente $BFP_{D1}(D)$ que fizesse a melhor discriminação entre dias em que se registou instabilidade geomorfológica e dias em que não houve instabilidade, tendo em conta os critérios anteriormente definidos.

O limiar de precipitação responsável pelo desencadeamento de movimentos de vertente corresponde, deste modo, a uma conjunção entre duas funções distintas: $I(D) \wedge P_{D1}(D)$ ambas do tipo $y = a x^{-b}$ (função potencial), sendo o parâmetro a igual para ambas as funções.

4. Resultados

4.1. Limiares de precipitação

Através da aplicação da dGVE verifica-se que 14 eventos de instabilidade geomorfológica têm PR inferior a 2 anos, 21 eventos têm PR entre 2 e 10 anos, e que apenas 10 eventos têm PR superiores a 10 anos. Os eventos que causaram mortes, correspondentes aos dias 2 de Setembro de 1986, 31 de Outubro de 1997 e 6 de Março de 2005, apresentam $D=1$, intensidades de 161,6, 220,0 e 197,8 mm/dia e períodos de retorno de 7, 50 e 24 anos respectivamente.

A ocorrência de movimentos de vertente no concelho da Povoação é regida pela função $I(D)=136,86 D^{-0,556}$ ($R^2=0,94$), correspondendo $BFI(D)=61,93 D^{-0,4643}$ à envolvente de discriminação entre episódios de instabilidade geomorfológica e dias em que não se registou instabilidade (Fig.2).

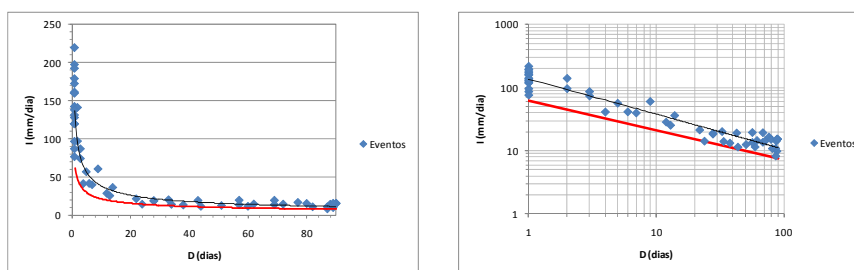


Figura 2. Função de regressão potencial dos pares I-D dos eventos de instabilidade geomorfológica ($I(D)$ a preto) e envolvente de discriminação entre eventos de instabilidade geomorfológica e dias em que não se registou instabilidade ($BFI(D)$ a vermelho).

Na figura 2 verifica-se claramente a existência de dois regimes hidrológicos distintos associados com a ocorrência de movimentos de vertente, um caracterizado por curtas durações de precipitação acumulada, às quais estão associadas elevadas intensidades, e outro associado a longas durações de precipitação acumulada, caracterizadas por intensidades médias de precipitação claramente mais baixas.

Para valores de $D \neq 1$, os valores de I subestimam a precipitação registada no dia do evento (P_{D1}) agravando-se este problema com $D \rightarrow 90$. Para contornar este problema foi definida a função $P_{D1}(D)=131,81 D^{-0,143}$ ($R^2=0,44$), correspondendo $BFP_{D1}(D)=61,93 D^{-0,0582}$ à envolvente de discriminação entre episódios de instabilidade geomorfológica e dias em que não se registou instabilidade (Fig.3).

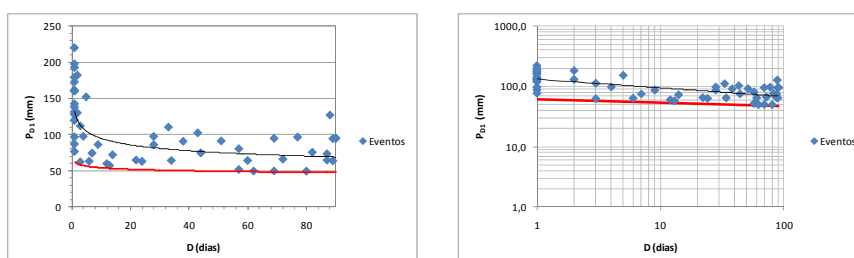


Figura 3. Função de regressão potencial dos pares P_{D1} -D dos eventos de instabilidade geomorfológica ($P_{D1}(D)$ a preto) e envolvente de discriminação entre eventos de instabilidade geomorfológica e dias em que não se registou instabilidade ($BFP_{D1}(D)$ a vermelho).

Verifica-se, pela análise da figura 3, que para durações curtas de precipitação acumulada a exigência da precipitação no dia do evento de instabilidade é superior à precipitação necessária para desencadear movimentos de vertente para episódios caracterizados por períodos de precipitação acumulada de maior duração.

Considerando uma determinada data $dx(I(D); P_{D1})$, a conjunção $dx(I(D)) \geq BFI(D) \wedge dx(P_{D1}) \geq BFP_{D1}(D)$ traduz o limiar de precipitação para o desencadeamento de um episódio de instabilidade geomorfológica. A figura 4 representa a probabilidade mensal relativamente a D do limiar definido pela conjunção ser atingido, verificando-se uma boa concordância entre os eventos considerados neste trabalho e as zonas de maior probabilidade. Para $D=1$, correspondente a elevadas intensidades de precipitação, a probabilidade de desencadear fenómenos de instabilidade geomorfológica é particularmente elevada ($Prob > 0,3$), entre os meses de Outubro e Dezembro mas também entre Fevereiro e Março, tendo correspondência com 23,6% do total dos eventos identificados (Fig. 4) e com a totalidade dos eventos causadores de mortes. Para durações de precipitação acumulada mais longas $D=[20,90]$ é entre Novembro e Abril, e particularmente entre Novembro e Janeiro, que se verifica a maior probabilidade de ocorrência de movimentos de vertente, fruto da acumulação de precipitação durante o Outono e principalmente no Inverno, tendo correspondência com 50,9% dos eventos identificados (Fig. 4). Verifica-se que, independentemente da duração de precipitação acumulada associada ao episódio de instabilidade geomorfológica, entre Outubro e Maio existe uma elevada probabilidade de ocorrência de um fenómeno desta natureza com um período de retorno inferior a 5 anos, tendo correspondência com 90,9% dos eventos identificados (Fig. 4).

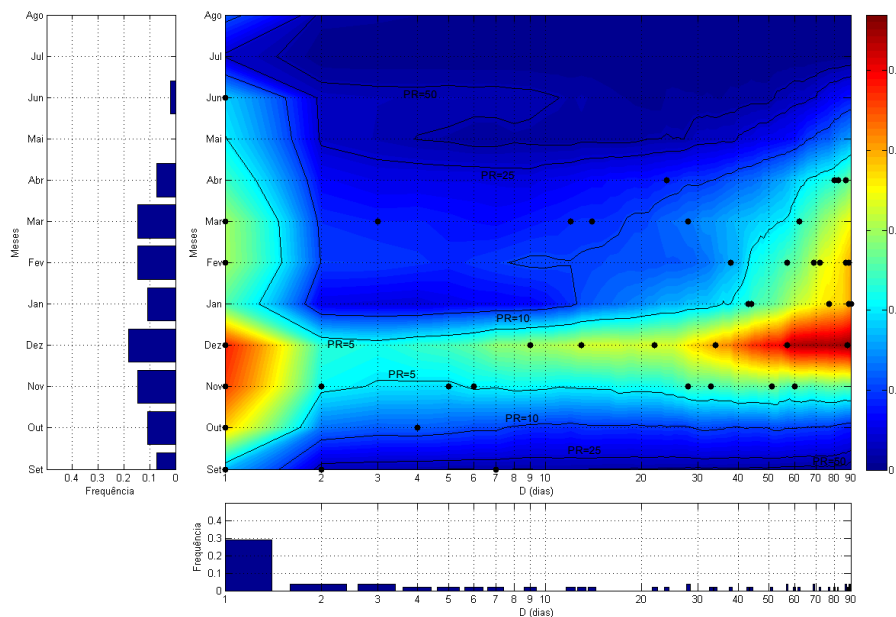


Figura 4. Probabilidade mensal do limiar de precipitação para a ocorrência de instabilidade geomorfológica ser excedido e respectivas frequências mensais e de duração de precipitação acumulada para os eventos estudados. Os círculos pretos representam os eventos de instabilidade geomorfológica estudados.

4.2. Sistema de alarme

Para o desenvolvimento do sistema ELEWS-Pov foi acrescentada uma constante c à conjunção de limiar, tomando a forma de $dx(I(D)) \geq BFI(D) \wedge dx(P_{D1}) \geq BFP_{D1}(D) - c$. Considera-se $c=0$ para a definição de um alarme e $c=10$ para a definição de um alerta.

Como forma de validação foi utilizado um método de retro-análise entre 1990/91 e 2007/08, calculando-se ciclicamente, no término de cada ano climatológico ou a cada nova ocorrência de um evento de instabilidade geomorfológica, os pares $I-D$ e $P_{D1}-D$, bem como as funções $BFI(D)$ e $BFP_{D1}(D)$, dando-se assim um carácter temporalmente dinâmico à conjunção de alerta e alarme.

Verificou-se que o sistema prediz correctamente a totalidade dos eventos de instabilidade geomorfológica identificados, com um uma taxa de 6,1 falsos alarmes/ano, situando-se no mês de Dezembro, para o período de validação, a maior taxa de falsos alarmes (1,6 falsos alarmes/ano).

5. Considerações Finais

A identificação de 55 episódios de instabilidade geomorfológica no concelho da Povoação entre os anos climatológicos de 1976/77 e 2007/08, demonstra indubitavelmente a elevada reincidência deste tipo de fenómeno nesta área da ilha de S. Miguel. Este facto é corroborado pelo baixo período de retorno, inferior a 5 anos, associado à probabilidade de excedência da conjugação de limiar de precipitação para o desencadeamento de movimentos de vertente entre os meses de Outubro e Maio, tendo correspondência com 90,9% dos eventos identificados.

O presente trabalho permite confirmar a existência de dois regimes hidrológicos distintos para a ocorrência de movimentos de vertente no concelho da Povoação, à semelhança do que já havia sido identificado por Marques *et al.* (2008), através da função $I(D)$. Um regime associado a períodos curtos de precipitação acumulada, caracterizados por intensidades de precipitação elevadas, ao qual têm correspondência a totalidade de eventos causadores de mortes; e um regime associado a períodos mais longos de precipitação acumulada e a intensidades médias de precipitação mais baixas.

Com a definição da função $P_{D1}(D)$ verificou-se que, com o aumento da precipitação acumulada no solo, diminui a quantidade de precipitação necessária para desencadear um episódio de instabilidade geomorfológica no dia da sua ocorrência, demonstrando a importância da precipitação acumulada antecedente para o desencadeamento de movimentos de vertente associados a durações mais longas.

O desenvolvimento do ELEWS-Pov, baseado na conjugação entre as funções empíricas $I(D)$ e $P_{D1}(D)$, demonstra ser uma boa ferramenta para a mitigação do impacte deste perigo, revelando uma média de 6,1 falsos alarmes/ano para o período de validação entre 1990/91 e 2007/08.

A conjugação do limiar de precipitação foi normalizada pela precipitação média anual (PMA) e aplicada a 1 estação meteorológica e 4 postos udométricos localizados no concelho. Todo o procedimento descrito foi automatizado por uma série de rotinas programadas em MATLAB e os alertas e alarmes enviados, por uma aplicação desenvolvida em JAVA, por SMS e e-mail, para o Centro de Operações de Emergência do Centro de Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos da Universidade dos Açores.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Direcção Regional do Ordenamento do Território e Recursos Hídricos, do Governo Regional dos Açores, a cedência dos dados de precipitação utilizados neste trabalho.

Referências

- Crosta G.B., 1989. A study of slope movements caused by heavy rainfall in Valtellina (Italy – July 1987). In: Cancelli A. (Ed.), Proceedings of the 6th International Conference and Field Workshop on Landslides ALPS 90, 79b:247-258.
- Guzzetti G., Peruccacci S., Rossi M. & Stark C.P., 2007. Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 98: 239-267.
- Marques R., Zêzere J.L., Trigo R., Gaspar J.L. & Trigo I., 2008. Rainfall patterns and critical values associated with landslides in Povoação County (São Miguel Island, Azores): relationships with the North Atlantic Oscillation (NAO), *Hydrological Processes*, 22: 478-494.
- Pereira S., Zêzere J.L. & Bateira C., 2009. Estabelecimento de limiares de precipitação de base empírica para a ocorrência de fluxos de lama e de detritos no Norte de Portugal. *Publicações da Associação Portuguesa de Geomorfólogos*, 6:155-162.
- Wieczorek G.F. & Glade T., 2005. Climatic factors influencing occurrence of debris flows. In: Jakob M. & Hungr O. (Eds.). Berlin Heidelberg, Springer, 325-362.
- Zêzere J.L., Trigo R. & Trigo I., 2005. Shallow and deep landslides induced by rainfall in the Lisbon region (Portugal): assessment of relationships with the North Atlantic Oscillation. *Natural Hazards and Earth Systems Sciences*, 331-344.