

ANÁLISE DA SUSCEPTIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS USANDO A ABORDAGEM ESTATÍSTICA DO FATOR DE CERTEZA NO MUNICÍPIO DE MOEDA, MINAS GERAIS

LANDSLIDES SUSCEPTIBILITY ANALYSIS USING STATISTICAL APPROACH OF CERTAINTY FACTOR IN THE MOEDA COUNTY, MINAS GERAIS

CESAR FALCÃO BARELLA

Universidade Federal de Ouro Preto. E-mail: cesarbarella@gmail.com

FREDERICO GARCIA SOBREIRA

Universidade Federal de Ouro Preto. E-mail: sobreira@degeo.ufop.br

RESUMO ABSTRACT

Nas últimas décadas vêm sendo observada uma intensificação dos processos geodinâmicos com consequências desastrosas, fruto da expansão irregular e desordenada dos centros urbanos. Para minimizar as implicações desses eventos, em 2012, foi instituída a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil, que visa, entre outras premissas, estabelecer estudos de identificação e avaliação de áreas susceptíveis, ou seja, o mapeamento de susceptibilidade a eventos geológico-geotécnicos. Dentre as diferentes abordagens existentes, as técnicas estatísticas têm-se destacado por minimizar a subjetividade imposta pelo operador e permitir a validação do próprio modelo preditivo. Assim, com o foco nos escorregamentos, esse trabalho buscou testar a aplicabilidade da técnica do fator de certeza e avaliar sua acurácia por meio da taxa de sucesso e predição. Aplicado em uma área piloto, que se localiza no município de Moeda-MG, o modelo, integrado pela declividade, geologia, geomorfologia e perfil e orientação das vertentes foi considerado um instrumento promissor na elaboração do mapa de susceptibilidade. Os resultados foram agrupados em zonas de acordo com o número de escorregamentos previstos. A classe mais susceptível conseguiu evidenciar 70% dos deslizamentos, ocupando apenas 29% do território, alcançando, dessa forma, o objetivo de restringir uma elevada quantidade de futuros movimentos numa pequena porção do terreno.

Palavras-chave: Susceptibilidade, Escorregamentos, Técnicas Estatísticas, Fator de Certeza.

An intensification of geodynamic processes with disastrous consequences as a result of irregular and disorderly expansion of urban centers has been observed in the last decades. To minimize the implications of these events, the National Policy for Protection and Civil Defense was instituted in 2012, which aims, among other assumptions, to conduct studies to identify and assess susceptibility areas, i.e., to draw susceptibility maps. Among the various approaches, statistical techniques have been used to reduce the subjectivity imposed by the operator, allowing the validation of the predictive model. Thus, focusing on landslide, this study tested the applicability of the certainty factor technique and evaluated its accuracy by the success and prediction rate. Applied in a pilot area located in the region of Moeda-MG, the model, integrated by the slope, geology, geomorphology, profile and orientation of the hillside, was considered a promising tool in the preparation of the susceptibility map. The results were grouped into zones according to the number of predicted landslides. The most susceptible class forecasted 70% of landslides, occupying only 29% of the territory, thus reaching the goal of restricting a high amount of future movements in a small portion of land.

Keywords: Susceptibility, Landslides, Statistical Techniques, Certainty Factor.

1 INTRODUÇÃO

O processo de expansão dos centros urbanos brasileiros ao longo das últimas décadas, fruto do êxodo rural, trouxe consigo, quando aliado às disparidades de renda, uma intensa urbanização de áreas com características desfavoráveis à ocupação (Novaes, 2000). As consequências mais evidentes e graves da omissão do poder público frente ao crescimento caótico dos centros urbanos é a tendência mundial de intensificação de prejuízos associados à ocorrência de desastres naturais.

De acordo com os dados publicados no Atlas Brasileiro de Desastres Naturais, o país experimentou mais de 31 mil desastres nos últimos 22 anos, uma média de mais de 1.400 catástrofes por ano (CEPED-UFSC, 2012). Com a função de cobrir uma demanda por instrumentos legais capazes de balizar esse ordenamento foi promulgada em abril de 2012 a Lei 12.608, que instituiu a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil – PNPDEC. A PNPDEC prioriza ações preventivas relacionadas à minimização de desastres naturais, enfatizando, entre outras premissas, a realização de estudos de identificação e avaliação de áreas susceptíveis a eventos geológico-geotécnicos, ou seja, a elaboração da carta municipal de susceptibilidade (Brasil, 2012).

Na literatura geotécnica, geomorfológica e de geologia de engenharia, a análise da susceptibilidade muitas vezes é referida como estudos de previsão de áreas instáveis (Tominaga, 2007), que refletem a variação, em forma e grau, da capacidade dos terrenos em desenvolver determinado evento (Freitas, 2000). Corresponde basicamente ao mapeamento da expectativa espacial de ocorrência de um fenômeno, sob influência de um determinado conjunto de condicionantes ambientais. Esse tipo de produto tem o anseio por avaliações mais gerais, buscando indicar as áreas mais favoráveis aos diversos usos em função das restrições impostas pelos processos envolvidos (Sobreira & Souza, 2012).

De acordo com Julião *et al.* (2009), essa abordagem permite, além da representação da incidência espacial do processo, identificar e classificar as áreas com maior propensão de serem afetadas em um tempo indeterminado. Seu desenvolvimento se dá em diversas escalas, normalmente mais

abrangentes, com base na seleção de uma série de agentes condicionantes ao processo, sem levar em consideração seus impactos sobre o meio ambiente, a sociedade e a economia. O produto final visa orientar o crescimento urbano do município de forma sustentável, podendo, ainda, assinalar áreas mais propensas às avaliações de risco ou de aptidão a urbanização.

Diversos métodos têm sido desenvolvidos a partir de meados da década de 70 até a atualidade, porém as diferentes abordagens existentes não podem ser igualmente aplicadas (Soeters & Van Western, 1996). Isso se deve à escala trabalhada, à área cartografada, à qualidade dos dados de entrada disponíveis e os custos envolvidos. Apesar da classificação das metodologias ser algo subjetivo, que pode variar de acordo com a ênfase dada às características dos procedimentos adotados, na grande maioria das vezes, as técnicas aplicadas se enquadram nos enfoques geomorfológicos, heurísticos, estatísticos ou determinísticos. Entretanto, de modo geral, a evolução no desenvolvimento metodológico do mapeamento de susceptibilidade tem buscado o aperfeiçoamento da precisão gráfica do produto final gerado e a diminuição da intervenção do profissional ao longo do trabalho.

Internacionalmente, os métodos estatísticos vêm sendo amplamente difundidos (Van Westen, 1993; Zêzere, 1997; Chung & Fabbri, 1999; Lee, 2004; Guzzetti, 2005; entre outros), uma vez que “minimizam” a subjetividade imposta pelo operador, quando comparado aos procedimentos geomorfológicos e heurísticos. São adequados, segundo Soeters & van Westen (1996), à escala 1:25.000 e constituem abordagens indiretas e quantitativas que estabelecem correlações espaciais entre os processos e os parâmetros causadores de instabilidade que estão sendo analisados (Guzzetti *et al.*, 1999). De acordo com Fernandes *et al.* (2001), esse ferramental é baseado em padrões mensurados a partir de observações de campo, ao invés da simples experiência do pesquisador, sendo de suma importância a disponibilidade de extensos bancos representativos dos processos, fato ainda raro na realidade brasileira.

Múltiplos artifícios estatísticos têm sido empregados na elaboração das análises de susceptibilidade, como, por exemplo, *Likelihood Ratio*, Valor Informativo, Pesos de Evidência, Probabilidade

Bayesiana, Análise Discriminante, Regressão Logística, Lógica Fuzzy, etc. Dentre uma gama variada de modelos possíveis, este trabalho selecionou o método do Fator de Certeza para a investigação, já que essa técnica foi considerada menos difundida comparativamente a outras modalidades. Nesse contexto, a análise desenvolvida visa testar, em uma área piloto, a aplicabilidade dessa concepção metodológica e avaliar sua adequabilidade como instrumento eficaz de elaboração de mapas de susceptibilidade a escorregamentos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia adotada na construção dessa análise foi estabelecida de acordo com a aproximação genérica de Aleotti & Chowdhury (1999), porém adaptada ao estudo em questão, tendo as seguintes etapas: (1) elaboração do mapa de inventário; (2) seleção e mapeamento dos parâmetros condicionantes ao processo e subdivisão de cada parâmetro em um número de classes relevantes; (3) sobreposição dos diferentes mapas de parâmetros ao mapa de inventário; (4) aplicação das equações matemáticas da técnica do Fator

de Certeza em cada classe, de cada parâmetro, a fim de se determinar os pesos de ponderação; (5) análise sensitiva dos parâmetros utilizados; (6) cruzamento dos mapas de parâmetros seguindo a ordem estipulada pela etapa anterior; (7) determinação do grau de ajuste dos dados em cada modelo integrado; (8) seleção do modelo mais robusto e determinação de sua capacidade preditiva; e (9) classificação do modelo final elegido em 3 classes: alta média e baixa susceptibilidade a movimentos de massa, em função da capacidade preditiva individual de cada classe.

2.1 Localização e acesso

A área selecionada para a aplicação do método proposto compreende o município de Moeda, Minas Gerais, distante, aproximadamente, 58 km da capital Belo Horizonte. O acesso é feito pela rodovia BR-040, na altura do km 575. Parte da região integra a borda oeste da unidade geológica Sinclinal Moeda, definida por Dorr II (1969), que contempla a serra homônima, com amplitudes de relevo muito elevadas e vertentes íngremes (Figura 1), sustentadas por quartzitos e itabiritos.

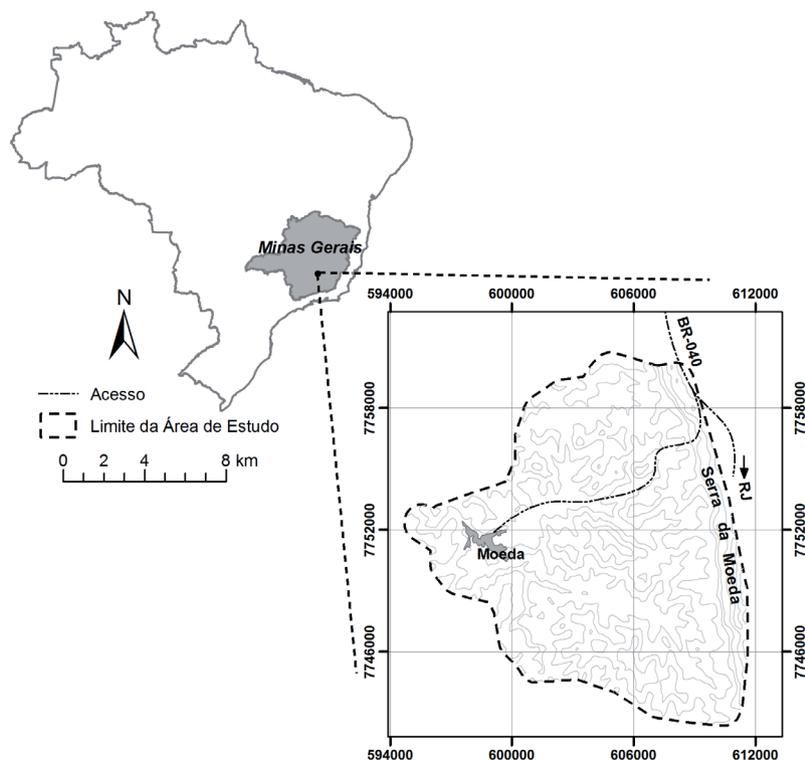


Figura 1 - Localização da região selecionada para a aplicação da metodologia proposta.

2.2 Inputs do modelo

Apesar de existir um amplo acervo de temas influentes na previsão de escorregamentos, a seleção dos fatores condicionantes para a elaboração dos mapas de susceptibilidade vai depender do tipo de movimento que está sendo investigado, das características do terreno, da disponibilidade de dados e informações existentes, dos custos envolvidos na análise e da escala que está sendo utilizada (Van Westen *et al.*, 2008). Em função do exposto acima foram selecionados para a investigação os seguintes parâmetros, todos definidos por uma unidade cartográfica baseada no pixel de 5 metros de resolução: declividade, orientação e curvatura das vertentes, unidades litológicas e geomorfológicas.

Muitas vezes considerada a principal fonte de informação utilizada na construção dos modelos de previsão, a topografia utilizada teve origem na elaboração do modelo digital de elevação (MDE-TIN), derivado da interpolação de curvas de nível vetorizadas das cartas topográficas 1:25.000 da Diretoria de Serviço Geográfico do Exército (DSG), dando origem a uma série de parâmetros como segue: (i) declividade, classificada em grupos com amplitude de 5°; (ii) orientação das vertentes, classificada em pontos cardeais (N, S, L e O) e colaterais (NL, NO, SL e SO). Sua utilização teve o intuito de contemplar indiretamente a influência de estruturas geológicas identificadas, porém não utilizadas no mapeamento devido à falta de informação compatível com a escala, gerando, dessa forma, um modelo mais conservativo. Ainda, esse parâmetro permite refletir diferenças na umidade do solo e na vegetação (Van Westen *et al.*, 2008); (iii) curvatura total das vertentes, elaborada a partir da combinação entre os perfis transversais e longitudinais decompostos em formas côncavas, lineares e convexas. Foi arquitetada, inicialmente, a partir de *pixels* de 50 metros, convertidos, posteriormente, em 5 metros, uma vez que resoluções espaciais mais abrangentes geram acuidades visuais das formas mais evidentes ao operador. Escalas de maior detalhamento tornam complexa a caracterização do tipo de perfil da vertente, além de delinear as facetas da triangulação efetuada para se obter o MDE (Garcia, 2012).

A geologia utilizada seguiu as observações de Varnes *et al.* (1984). Isto é, foi agrupada em

unidades litológicas, não preservando, necessariamente, a ordem estratigráfica, mas estabelecendo um agrupamento com base em observações ou inferências de estabilidade. Como a geologia é diversificada, a área investigada foi desmembrada em duas grandes porções, uma situada no Sinclinal Moeda, extremo leste do território, com o domínio de rochas metamórficas, como, por exemplo, itabiritos, filitos e quartzitos, muitas intensamente estruturadas, e outra, à medida que se avança para o interior (sentido oeste), composta por gnaisses, granodioritos e tonalitos, representando a segunda porção do território. Assim, a elaboração do cartograma de unidades litológicas foi derivada da combinação entre as Cartas do Quadrilátero Ferrífero (Lobato *et al.*, 2005) e o Mapa Geológico do Estado de Minas Gerais (Heineck *et al.*, 2003), sendo que essa abordagem só foi aceita devido ao fato da porção com escala em menor detalhe ser formada por uma geologia homogênea, que pouco se modifica ao longo da região analisada e que não deve ser indutora de movimentos. Por fim, as litologias foram agregadas segundo suas características predominantes, formando os seguintes grupos: Unidade Litológica de Filito - ULF, Unidade Litológica de Xisto - ULX, Unidade Litológica de Itabirito - ULI, Unidade Litológica de Quartzito - ULQ, Unidade Litológica de Gnaise - ULG, Unidade Litológica de Granodiorito e Tonalito - ULGT, Unidade Litológica de Diabásio - ULD e Unidade Litológica Elúvio-Colúvial - ULEC

A geomorfologia foi inserida nas análises de susceptibilidade por meio do agrupamento de unidades de relevo com características semelhantes. Teve por base o sistema de classificação definido pela concepção de Ponçano *et al.* (1979), porém adaptada ao limiar de declividade média de 15° (Tabela 1). A menor unidade de análise utilizada na definição das amplitudes locais foi a delimitação das bacias hidrográficas geradas a partir do modelo digital de elevação invertido.

Partindo do postulado básico de que os eventos geodinâmicos se sucedem na paisagem sob a influência das mesmas condições, a inventariação de movimentos passados é um dos parâmetros de entrada mais importantes nas metodologias estatísticas de mapeamento. Tem por princípio o reconhecimento e a cartografia de sinais deixados

por antigos escorregamentos. Em geral, esses sinais refletem mudanças morfológicas, tais como, variação da forma, inclinação, posição, aparência e topografia das encostas, que podem ser corroboradas por alterações da paisagem (solo exposto/vegetação, presença de depósitos, etc.) (Guzzetti *et al.*, 2012). Para tal, foram utilizadas as imagens

do *Google Earth Pro* justapostas às curvas de nível e sobrepostas ao modelo 3D com exagero vertical, tudo com o intuito de facilitar a interpretação. Campanhas de campo foram realizadas em sítios específicos, selecionados aleatoriamente, objetivando calibrar o processo de fotointerpretação e validar “*in loco*” o inventário produzido.

Tabela 1 – Critérios adotados na identificação de sistemas de relevo (adaptado de Ponçano *et al.*, 1979).

Unidades Geomorfológicas	Declividade da Vertente	Amplitude Local
Relevo Colinoso	< 15°	< 100 m
Relevo de Morros com Vertentes Suavizadas	< 15°	100 - 300 m
Relevo de Morrotes	> 15°	< 100 m
Relevo de Morros	> 15°	100 - 300 m
Relevo Montanhoso	> 15°	> 300 m

2.2 Método do fator de certeza

Inicialmente desenvolvida com o intuito de auxiliar diagnósticos médicos (Shortliffe & Buchanan, 1975), a técnica do Fator de Certeza foi posteriormente incorporada ao espectro das

metodologias estatísticas de mapeamento de susceptibilidade a escorregamentos (Chung & Fabbri, 1993; Binaghi *et al.*, 1998; Luzi & Pergalani, 1999; Long, 2008; Sujatha *et al.*, 2012; Devkota *et al.*, 2013). Pode ser matematicamente formulada a partir da equação (1) (Heckerman, 1986).

$$CF_{ij} = \begin{cases} \frac{P(S|N_{ij}) - P(S)}{P(S|N_{ij}) \cdot (1 - P(S))} \rightarrow P(S|N_{ij}) \geq P(S) \\ \frac{P(S|N_{ij}) - P(S)}{P(S) \cdot (1 - P(S|N_{ij}))} \rightarrow P(S|N_{ij}) < P(S) \end{cases} \quad (1)$$

Onde, N_{ij} representa a classe i de um tema cartográfico j utilizado no mapeamento ($i, j = 1, 2, 3, 4, \dots, n$) e S faz referência aos escorregamentos inventariados. Logo, $P(S|N_{ij})$ é a probabilidade de um acontecimento S se realizar condicionado à N_{ij} , que nada mais é que a relação entre os escorregamentos cartografados em alguma classe i , de algum cartograma j , e a área ocupada por essa mesma classe, e $P(S)$ é a probabilidade à priori de um escorregamento ocorrer ao longo da área de estudo, ou seja, é a relação entre todos os escorregamentos cartografados e a região investigada.

Cada CF_{ij} é concebido como um valor numérico compreendido entre +1 e -1, onde valores positivos significam o aumento da certeza de encontrar um escorregamento e valores negativos a

diminuição da mesma (Luzi & Pergalani, 1999). Assim, quanto maior a magnitude dos valores positivos maior é a influência do parâmetro analisado sobre o processo, ao passo que quanto maior a magnitude dos valores negativos menor é essa influência. Valores próximos a zero significam que a probabilidade condicionada é muito similar à probabilidade à priori, não sendo possível afirmar nada sobre a certeza da proposição (Binaghi *et al.*, 1998).

Determinada a influência singular de todas as variáveis explicativas consideradas, a sobreposição dos dados é feita em pares, obedecendo a regra de integração verificada em Devkota *et al.* (2012) e Long (2008), apresentada pela equação (2).

$$\begin{aligned}
 & CF_{i1} + CF_{i2} - (CF_{i1} \cdot CF_{i2}) \rightarrow CF_{i1}, CF_{i2} \geq 0 \\
 & \quad \square \\
 CF = & \frac{CF_{i1} + CF_{i2}}{1 - \min(|CF_{i1}|, |CF_{i2}|)} \rightarrow CF_{i1}, CF_{i2}: \text{ sinal oposto} \\
 & \quad \square \\
 & CF_{i1} + CF_{i2} + (CF_{i1} \cdot CF_{i2}) \rightarrow CF_{i1}, CF_{i2} < 0
 \end{aligned} \tag{2}$$

CF representa o resultado da integração de dois parâmetros (CF_{i1} e CF_{i2}), como, por exemplo, declividade e perfil das vertentes. Esse resultado (CF) deve ser novamente integrado a outro tema qualquer, até que todos os cartogramas explicativos sejam incorporados, sempre dois a dois e obedecendo as regras de agrupamento expostas na equação (2).

2.3 Análise de sensibilidade

Durante a composição de uma análise estatística de susceptibilidade, diversos são os fatores de predisposição que podem ser incorporados, cada qual com sua parcela de influência no desencadeamento do evento. Visto que o aumento no número de parâmetros não se traduz, necessariamente, num aumento de qualidade (Zêzere *et al.*, 2005; Sterlacchini *et al.*, 2011; Piedade *et al.*, 2011), é importante compreender a influência que cada parâmetro tem sobre o evento investigado.

Nesse sentido, para a realização dessa etapa, cada mapa de parâmetro foi, de forma individual, avaliado a partir da Curva de Sucesso, ferramenta que será abordado mais à frente, no tópico que envolve a validação dos modelos de susceptibilidade. Com base nos resultados alcançados por esse procedimento, os diversos cartogramas explicativos foram hierarquizados de acordo com seu grau de relevância sobre o processo, de forma a garantir que a regra de integração representada pela equação (2) obedeça à ordem estipulada pela análise de sensibilidade.

2.4 Validação do modelo de susceptibilidade

A validação é a etapa metodológica destinada à avaliação do grau de confiança nos resultados encontrados. É um instrumento importante durante a transferência dos produtos ao usuário

final, uma vez que decisões podem ser tomadas levando-se em consideração a qualidade dos mapas produzidos, o que pode ser acessado através de sua acurácia e poder preditivo (Beguería, 2006). Visto a inviabilidade de se esperar por futuras instabilizações de vertente na paisagem para assegurar a previsibilidade de um modelo, procedimento conhecido como “*wait and see*” (Soeters & Van Westen, 1996). Chung & Fabbri (2003) propuseram artifícios para a produção de amostras de escorregamentos autônomos. Para isso é necessário restringir a utilização dos movimentos cartografados e particionar o inventário de forma que parte dos eventos seja utilizada na modelagem e a outra na avaliação dos resultados.

Assim, para assegurar a envergadura do modelo de susceptibilidade empregado no município de Moeda, uma divisão aleatória foi aplicada aos escorregamentos inventariados, sendo que metade dos eventos cartografados foi utilizada na construção da abordagem matemática do Fator de Certeza. A metade restante foi utilizada, com um evento independente, para a certificação da capacidade preditiva dos resultados obtidos.

Os métodos utilizados para estimar a qualidade dos mapas gerados foram as Curvas de Sucesso e Predição. A grande diferença entre ambas as técnicas reside na parcela do inventário utilizada. A Curva de Sucesso faz uso da parcela do inventário empregada na modelagem, logo, avalia o grau de ajuste do modelo aos dados. A Curva de Predição utiliza a parte restante do inventário, ainda não utilizada, e seu resultado tende a avaliar a capacidade do modelo em prever futuras manifestações de instabilidade (Pereira, 2009; Piedade *et al.*, 2010). Em resumo, a Curva de Sucesso avalia o resultado entre o modelo e os dados que o originaram, ao passo que a Curva de Predição, a partir do momento que decorre de um processo de validação independente, apresenta capacidade de prever um acontecimento num

horizonte temporal indefinido (Zêzere, 2006). Devido ao exposto acima, deve-se esperar que a curva de sucesso seja sempre superior à de predição (Chung & Fabbri, 2003). Para facilitar a interpretação dos resultados, foi calculada a Área Abaixo da Curva (AAC) de todos os gráficos utilizados na estimativa da qualidade do produto final gerado.

Dessa forma, cada vez que um mapa de parâmetro era adicionado ao modelo pelas leis de integração adotadas na equação (2), seguindo a hierarquia determinada na análise de sensibilidade, a área abaixo da curva de sucesso era calculada. O objetivo era avaliar se a integração proposta melhoraria ou pioraria o grau de ajuste do modelo aos dados inventariados. Todos os modelos gerados foram analisados comparativamente, de forma que o melhor resultado, ou seja, o modelo mais correto, foi selecionado para a análise subsequente, que envolveu a determinação da Curva de Predição.

3 RESULTADOS

A partir de uma abordagem comparativa entre os resultados da análise de sensibilidade (AAC) explicitados na Tabela 2, é possível perceber que a declividade é um parâmetro altamente influente, com destaque para as classes de declividade situadas no intervalo de 20° a 70°. Apesar da faixa localizada entre 45° e 70° apresentar os valores mais elevados de *CF*, o que eleva o grau de certeza de sua influência sobre os eventos, sua distribuição na região investigada é extremamente limitada, se restringindo a uma área inferior a 1,5 km², isto é, a poucos *pixels* que possivelmente podem, numa análise subsequente, ser englobados em numa única classe acima de 45°. Nesse contexto, o intervalo de 20 a 45° assume grande responsabilidade na análise, uma vez que apresenta coeficientes de *CF* positivos que abrangem aproximadamente 33% do município estudado.

A avaliação dos resultados referentes ao perfil das vertentes evidenciou que as formas capazes de concentrar o fluxo de água são as mais atuantes na identificação dos escorregamentos. Isso demonstra que o perfil horizontal está comandando o processo, fato que é facilmente observado pelos índices positivos dos valores de ponderação de *CF* para as formas das vertentes Convexa-Côncava, Linear-Côncava e Côncava-Côncava (Tabela 2).

No que diz respeito às unidades litológicas, os grupos compostos, predominantemente, por filitos, itabiritos e depósitos elúvio-colúviais são os que mais se destacaram no reconhecimento dos movimentos (Tabela 2). Partindo do pressuposto de que, via de regra, os itabiritos apresentam uma resistência considerável, uma explicação plausível para seu elevado *CF* pode estar na coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero (Alkmim & Marshak, 1998), uma vez que podem ser encontrados sobrepostos aos filitos. Desta forma, o problema não estaria na unidade rochosa em questão, mas no contato entre as camadas, gerando um zona de fluxo subsuperficial que culminaria na diminuição do atrito entre ambas, ocasionado a geração de uma possível superfície de ruptura. Os depósitos são, na sua grande maioria, compostos por canga, que constituem crostas superficiais lateríticas de grande resistência. Estão distribuídos pontualmente ao longo dos itabiritos, atingindo menos de 0,001% da área de estudo. Isso permite supor que essa unidade litológica pode ter sido englobada por eventos terceiros, podendo, numa análise subsequente, ser agrupada na Unidade Litológica de Itabirito - ULI.

A orientação das vertentes demonstrou que as encostas direcionadas para os sentidos sudeste, sul e leste apresentaram relações com os eventos cartografados (Tabela 2). A direção leste representa a orientação preferencial das camadas geológicas do flanco oeste do Sinclinal Moeda, o que ajuda a corroborar a hipótese atrelada aos elevados índices de *CF* para os itabiritos. No interior da área investigada, a oeste da Serra da Moeda, são observadas foliações nas direções predominantes sul e sudeste, provavelmente, resultado de gnaissificação. Como dados estruturais não foram levados em conta, a utilização dessas orientações podem gerar um modelo conservativo de análise, uma vez que encostas similares, porém não estruturadas, apresentaram pesos de ponderação mais elevados no resultado final.

Por último, as unidades geomorfológicas apresentaram-se relevantes principalmente no Relevo Montanhoso (Tabela 2), onde as amplitudes e declividades são mais acentuadas, podendo atingir valores superiores a ordem de 300 metros e 15 graus. Essa região estende-se ao longo de toda a Serra da Moeda, sendo também circunscrita numa parcela interiorana do município.

Tabela 2 - Valores de ponderação atribuídos às classes de todos os parâmetros explicativos por meio da técnica estatística do Fator de Certeza e avaliação do grau de relevância de cada fator predisponente.

Parâmetro Analisado	Classes de Intervalo	CF _{ij}	Análise Sensitiva (AAC)
Declividade	0 - 5	-0,69	0,715
	5 - 10	-0,89	
	10 - 15	-0,57	
	15 - 20	-0,11	
	20 - 25	0,31	
	25 - 30	0,48	
	30 - 35	0,61	
	35 - 40	0,68	
	40 - 45	0,73	
	45 - 50	0,77	
	50 - 55	0,79	
	55 - 60	0,74	
	60 - 65	0,65	
	65 - 70	0,82	
	70 - 75	-0,36	
	75 - 80	-0,02	
80 - 85	-1,00		
85 - 89,1	-1,00		
Perfil das vertentes (Curvatura)	Convexo - Convexo	-0,36	0,663
	Convexo - Linear	-0,12	
	Convexo - Côncavo	0,55	
	Linear - Convexo	-0,52	
	Linear - Linear	-0,79	
	Linear - Côncavo	0,29	
	Côncavo - Convexo	-0,45	
	Côncavo - Linear	-0,57	
	Côncavo - Côncavo	0,44	
Unidades Litológicas	Unidade Litológica de Filito	0,51	0,649
	Unidade Litológica de Itabirito	0,88	
	Unidade Litológica de Xisto	-1,00	
	Unidade Litológica de Quatzito	-0,03	
	Unidade Litológica de Granodiorito e Tonalito	-0,37	
	Unidade Litológica de Diabásio	-0,98	
	Unidade Litológica de Gnaiss	0,06	
	Unidade Litológica Elúvio-Coluvial	0,85	
Orientação das vertentes	Plano - Flat	-0,67	0,642
	Norte - N	-0,34	
	Nordeste - NE	-0,23	
	Leste - E	0,34	
	Sudeste - SE	0,51	
	Sul - S	0,46	
	Sudoeste SO	0,08	
	Oeste - O	-0,35	
	Noroeste - NO	-0,25	
Unidades Geomorf.	Relevo Colinoso	-0,52	0,594
	Relevo de Morros com Vertentes Suavizadas	-0,52	
	Relevo de Morrotes	-1,00	
	Relevo de Morros	0,07	
	Relevo Montanhoso	0,26	

Determinado o grau de relevância de cada fator predisponente na investigação, procedeu-se a hierarquização dos parâmetros com base na análise sensitiva, com o objetivo de alimentar a expressão de integração determinada pela equação (2). O resultado encontrado é apresentado na Figura 2, onde é possível observar quatro curvas de sucesso, uma para cada modelo. Pode-se perceber que a curva do modelo FC 4 está ligeiramente mais elevada que as demais, fato que é corroborado pelo cálculo da área abaixo da curva até o eixo das abscissas (AAC = 0,794). Isso demonstra que para uma mesma porcentagem do território, os modelos conseguem capturar diferentes porcentagens de escorregamentos. Por exemplo, em 20% do território, o modelo FC 1 consegue identificar, aproximadamente, 53% dos escorregamentos, ao passo que o modelo FC 4 consegue, para os mesmos 20%, modelar 60% dos movimentos. Assim, dentre os quatro modelos analisados, o que englobou todos os temas foi considerado mais robusto, uma vez que apresentou maior capacidade de individualizar as áreas mais propensas aos eventos.

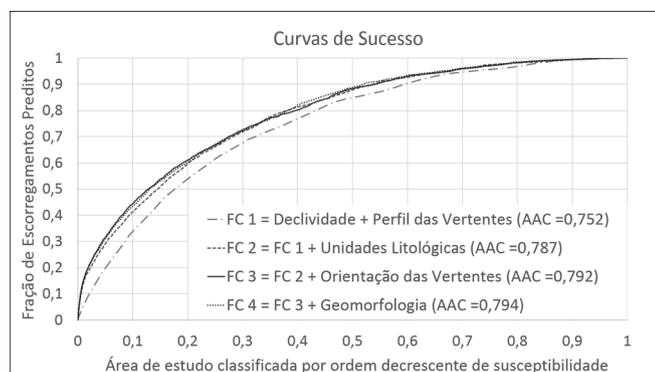


Figura 2 – Análise da taxa de sucesso dos diferentes modelos desenvolvidos pela combinação progressiva dos parâmetros.

A segunda etapa constou em avaliar a taxa de predição do Modelo FC 4, considerando a outra metade dos dados inventariados, ainda não utilizada na análise, logo, independente, simulando a ocorrência de novos eventos na paisagem (Figura 3). É notável uma queda na curva de predição quando comparada a de sucesso, fato que se deve ao modelo ser construído com um inventário (grupo de treino) e ser validado com outro (grupo de teste).

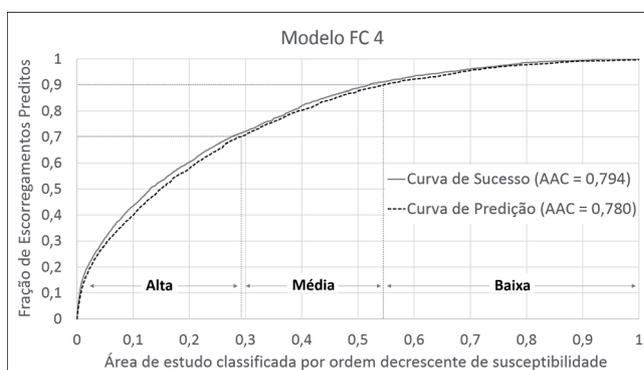


Figura 3 – Comparação entre as Curvas de Sucesso e de Predição para o Modelo FC 4.

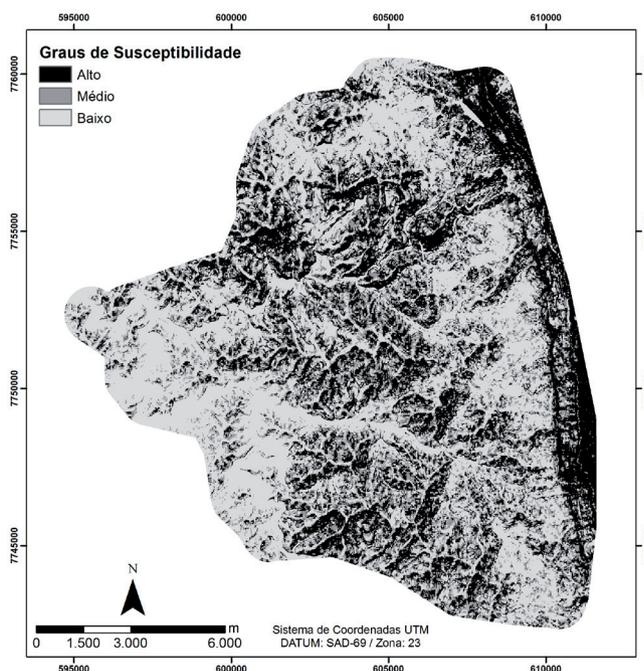


Figura 4 – Mapa de susceptibilidade a escorregamentos elaborado pelo método do Fator de Certeza.

Assim, com base na curva de predição, o território foi compartimentado em três zonas, alta, média e baixa susceptibilidade, tendo como base a previsibilidade de novos eventos em cada classe (Figura 3). A zona de alta susceptibilidade foi definida como a área que irá receber 70% dos futuros escorregamentos, correspondendo a 29% da região estudada, situada, predominantemente, ao longo da Serra da Moeda. A zona de média susceptibilidade foi definida como a área que irá sediar 20% dos novos movimentos, ocupando 25% do território. Por último, a zona de baixa susceptibilidade foi definida como a porção que será atingida por 10% dos futuros eventos e cobre cerca de 46% da região mapeada. Com base nessa proposta, os índices resultantes da integração

entre declividade, perfil e orientação das vertentes e unidades litológicas e geomorfológicas foram reagrupados para comportar as três classes discriminadas anteriormente, cada qual com sua capacidade preditiva, dando origem ao mapa de susceptibilidade a escorregamentos conforme é apresentado na Figura 4.

4 CONCLUSÃO

A abordagem estatística aplicada permitiu a identificação dos parâmetros mais influentes sobre o processo investigado. Em suma, as encostas situadas em áreas montanhosas, compostas por terrenos predominantemente filíticos e itabiríticos, direcionadas para leste, sul e sudeste, com declividade superior a 20 graus e morfologia capaz de concentrar o fluxo de água, apresentam os atributos mais propensos ao desencadeamento de deslizamentos num futuro ainda indeterminado, porém capaz de ser setorizado espacialmente. Vale ressaltar que essa combinação de fatores serve para descrever, em particular, a região alvo do estudo.

Dessa maneira, a técnica empregada permitiu identificar e integrar as características mais relevantes presentes em cada cartograma explicativo utilizado no processo de mapeamento, ao passo que, os métodos de validação empregados aferiram a robustez e a capacidade preditiva do modelo, além de permitir que o mesmo fosse classificado de forma menos subjetiva, com base na previsibilidade aferida a cada classe de susceptibilidade.

À vista do exposto acima pode-se concluir que a utilização do enfoque estatístico, que no caso específico desse trabalho foi o do Fator de Certeza, permitiu reconhecer as peculiaridades do local, as quais podem sofrer mutações de acordo com o ambiente que está sendo investigado. Essa é uma das grandes vantagens da aplicação desse tipo de metodologia, onde cada área mapeada é tratada na particularidade de seus condicionantes, minimizando a subjetividade imposta pelo operador, principalmente, quando métodos diagnósticos da capacidade preditiva são incorporados na análise.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro concedido pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), bem como ao Núcleo de Avaliação e Gestão de Perigosidades e Risco Ambiental (RISKam), do Instituto de Geografia e Ordenamento do Território da Universidade de Lisboa (IGOT-UL), onde foi desenvolvido parte do estudo.

REFERÊNCIAS

- Aleotti, P. & Chowdhury, R. 1999. Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 58: 21-44.
- Alkmim, F.F. & Marshak, S. 1998. Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, 90: 29-58.
- Beguiría, S. 2006. Validation and evaluation of predictive models in hazard assessment and risk management. *Natural Hazards*, 37: 315-329.
- Binaghi, E., Luzi, L., Madella, P., Pergalani, F. & Rampini, A. 1998. Slope instability zonation: a comparison between certainty factor and fuzzy dempster - shafer approaches. *Natural Hazards* 17: 77-97.
- Brasil. 2012. Lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012. Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil - PNPDEC; dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil - SINPDEC e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil - CONPDEC; e dá outras providências. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 11 p.
- CEPED-UFSC 2012. Atlas Brasileiro de Desastres Naturais 1991 a 2010: Volume Brasil. Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres/Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 94 p.

- Chung, C.F. & Fabbri, A.G. 1993. The representation of geoscience information for data integration. *Nonrenewable Resources*, 2: 122-139.
- Chung, C.F. & Fabbri, A.G. 1999. Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 65: 1389-1399.
- Chung, C.F. & Fabbri, A.G. 2003. Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping. *Natural Hazards*, 30: 451-472.
- Devkota, K.C., Regmi, A.D., Pourghasemi, H.R., Yoshida, K., Pradhan, B., Ryu, I.C., Dhital, M.R. & Althuwaynee, O.F. 2013. Landslide susceptibility mapping using certainty factor, index of entropy and logistic regression models in GIS and their comparison at Mugling–Narayanghat road section in Nepal Himalaya. *Natural Hazards*, 65: 135-165.
- Dorr II, J.V.N. 1969. Physiographic, Stratigraphic and Structural Development of Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. USGS/DNPM, Professional Paper 641-A, Washington, USA, 110 p.
- Fernandes, N.F., Guimarães, R.F., Gomes, R.A.T., Vieira, B.C., Montgomery, D.R. & Greenberg, H. 2001. Condicionantes geomorfológicos dos deslizamentos nas encostas: avaliação de metodologias e aplicação de modelo de previsão de áreas susceptíveis. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 2: 51-71.
- Freitas, C.G.L. 2000. Cartografia Geotécnica de Planejamento e Gestão Territorial: Proposta Teórica e Metodológica. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, USP, São Paulo, SP, 230 p.
- Garcia, R.A.C. 2012. Metodologias de avaliação de perigosidade e risco associado a movimentos de vertente: Aplicação na bacia da ribeira de Alenquer. Tese de Doutorado, Departamento de Geografia, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal, 437 p.
- Guzzetti, F. 2005. Landslide Hazard and Risk Assessment: Concepts, Methods and Tools for the Detection and Mapping of Landslides, for Landslides Susceptibility Zonation and Hazard Assessment, and for Landslide Risk Evaluation. PhD Thesis, Mathematisch-naturwissenschaftlichen Fakultät, Universität Bonn, Bonn, Germany, 373 p.
- 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., Mondini, A.C., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo, M. & Chang, K. 2012. Landslide inventory maps: New tools for an old problem. *Earth-Science Reviews*, 112: 42-66.
- Heckerman, D. 1986. Probabilistic interpretation of MYCIN's certainty factors. In: L.N. Kanal & J.F. Lemmer (eds.). *Uncertainty in Artificial Intelligence*. Elsevier, New York, USA, p.:298-311.
- Heineck, C.A., Leite, C.A.S., Silva, M.A. & Vieira, V.S. 2003. Mapa Geológico do Estado de Minas Gerais. CPRM, CODEMIG e Governo do Estado de Minas Gerais.
- Julião, R.P., Nery, F., Ribeiro, J.L., Branco, M.C. & Zêzere, J.L. 2009. Guia Metodológico para a Produção de Cartografia Municipal de Risco e para a Criação de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) de Base Municipal. Autoridade Nacional de Protecção Civil – ANPC, Portugal, 91 p.
- Lee, S. 2004. Application of likelihood ratio and logistic regression models to landslide susceptibility mapping using GIS. *Environmental Management*, 34: 223-232.
- Lobato, L.M., Baltazar, O.F., Reis, L.B., Achtschin, A.B., Baars, F.J., Timbó, M.A., Berni, G.V., Mendonça, B.R.V. & Ferreira, D.V. 2005. Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero - Integração e Correção Cartográfica em SIG com Nota Explicativa. CODEMIG, Belo Horizonte, CD-ROM.
- Long, N.T. 2008. Landslide Susceptibility Mapping of the Mountainous Area in a Luoi District, Thua Thien Hue Province, Vietnam. PhD Thesis, Department of Hydrology and Hydraulic

- Engineering, Vrije Universiteit Brussel, Brussels, Belgium, 229 p.
- Luzi, L. & Pergalani, F. 1999. Slope instability in static and dynamic conditions for urban planning: The 'Oltre Po Pavese' case history (Regione Lombardia - Italy). *Natural Hazards* 20: 57-82.
- Novaes, W., Ribas, O. & Costa Novaes, P. 2000. Agenda 21 Brasileira - Bases para Discussão. MMA/PNUD, Brasília, DF, 191 p.
- Pereira, S.S. 2009. Perigosidade a Movimentos de Vertente na Região Norte de Portugal. Tese de Doutorado, Departamento de Geografia, Universidade do Porto, Porto, Portugal, 370 p.
- Piedade, A., Zêzere, J.L., Garcia, R.A.C. & Oliveira, S.C. 2010. Avaliação e validação de modelos de susceptibilidade a deslizamentos em áreas homogêneas na região a Norte de Lisboa. In: Congresso da APDR - Regiões de Charneira, Canais de Fronteira e Nós, 16, Funchal, Portugal, Atas, p. 1305-1319.
- Piedade, A., Zêzere, J.L., Garcia, R. & Oliveira, S. 2011. Modelos de susceptibilidade a deslizamentos superficiais translacionais na Região a Norte de Lisboa. *Finisterra*, 46: 9-26.
- Ponçano, W.L., Carneiro, C.D.R., Almeida, M.A., Pires Neto, A.G. & Almeida, F.F.M. 1979. O conceito de sistemas de relevo aplicado ao mapeamento geomorfológico do estado de São Paulo. In: SBG, Simpósio Regional de Geologia, 2, Rio Claro, Atas, p. 253-262.
- Shortliffe, E.H. & Buchanan, B.G. 1975. A model of inexact reasoning in medicine. *Mathematical Biosciences*, 23: 351-379.
- Sobreira, F.G. & Souza, L.A. 2012. Cartografia geotécnica aplicada ao planejamento urbano. *Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental*, 2: 79-97.
- Soeters, R. & van Westen, C.J. 1996. Slope instability recognition, analysis, and zonation. In: A.K. Turner & R.L. Shuster (eds.). *Landslides: Investigation and Mitigation*. Transportation Research Board, National Research Council, Special Report 247, p.: 129-177.
- Sterlacchini, S., Ballabio, C., Blahut, J., Masetti, M. & Sorichetta, A. 2011. Spatial agreement of predicted patterns in landslide susceptibility maps. *Geomorphology*, 125: 51-61.
- Sujatha, E.R., Rajamanickam, G.V. & Kumaravel, P. 2012. Landslide susceptibility analysis using Probabilistic Certainty Factor Approach: A case study on Tevankarai stream watershed, India. *Journal of Earth System Science*, 121: 1337-1350.
- Tominaga, L.K. 2007. Avaliação de Metodologias de Análise de Risco a Escorregamentos: Aplicação de um Ensaio em Ubatuba, SP. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, USP, São Paulo, SP, 220.
- van Westen, C.J. 1993. Application of Geographic Information Systems to Landslide Hazard Zonation. PhD Thesis, Technical University Delft, International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences, the Netherlands, 245 p.
- van Westen, C.J., Castellanos, E. & Kuriakose, S.L. 2008. Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. *Engineering Geology*, 102: 112-131.
- Varnes, D.J. & IAEG Commission on Landslides and other Mass-Movements. 1984. *Landslide Hazard Zonation: A Review of Principles and Practice*. United Nations Educational, UNESCO, Paris, France, 63 p.
- Zêzere, J. L. 1997. Movimentos de Vertente e Perigosidade Geomorfológica na Região a Norte de Lisboa. Tese de Doutorado, Departamento de Geografia, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal, 575 p.
- Zêzere, J.L. 2006. Predição probabilística de movimentos de vertente na escala regional. Actes de les Jornades sobre Terrasses i Prevenció de Riscos Naturals, Department de Medi Ambient, Mallorca, Espanha: 17-30.
- Zêzere, J.L., Garcia, R.A.C., Oliveira, S.C. & Reis, E. 2005. Análise sensitiva na avaliação da susceptibilidade a deslizamentos na região a norte de Lisboa. In: APG, Colóquio Ibérico de Geografia, X, Évora, Portugal.