

PROBABILIDADE CONDICIONAL BAYESIANA NA ANÁLISE DE MOVIMENTOS DE MASSA

Bayesian conditional probability to the analysis of mass movements

Paulo César de Araújo*

Paulina Setti Riedel**

RESUMO – Através de técnica denominada aproximação bayesiana, este trabalho apresenta uma modelagem sobre parâmetros considerados importantes na análise de suscetibilidade a movimentos de massa, especificamente escorregamentos translacionais e corridas de massa a eles associados, com aplicação no Município de São Sebastião, estado de São Paulo, Brasil. A modelagem bayesiana é baseada em dados, ou seja, os parâmetros utilizados na análise são estimados através da avaliação dos relacionamentos espaciais entre ocorrências e condicionantes, aqui considerados como evidências. Foi utilizada a modelagem Pesos de Evidência (“Weights of evidence”), que possibilitou a combinação de várias evidências do processo, representadas por mapas, através de formulação log-linear das regras de Bayes. Um preceito importante do método é a exigência de independência condicional entre as evidências, medida através dos testes estatísticos do qui-quadrado e do teste global. O mapa final de suscetibilidade produzido mostra a probabilidade de ocorrência dos processos considerados, bem como o erro associado.

SYNOPSIS – This paper presents a Bayesian spatial modeling using parameters considered important for the analysis of susceptibility to, and occurrence of, mass movements, specifically shallow landslides, and the associated debris flows, applied in a section of the city of São Sebastião, state of São Paulo, Brazil. Bayesian modeling is data driven, that is, the parameters used in the analysis are estimated from statistical calculations carried out in locations selected for training purposes, through evaluation of the spatial relationships between the occurrences and the evidences. Weights of evidence modeling made it possible to combine various evidences of the process, represented by maps, using a log-linear formulation of Bayes rules. An important precept of the method is the requirement of conditional independence among the evidences, measured using the chi-squared and global statistical tests. The final map of susceptibility showed the probability of occurrence of the processes considered, as well as the associated error.

PALAVRAS CHAVE – Análise probabilística, suscetibilidade, movimentos de massa.

1 – INTRODUÇÃO

A suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa tem sido avaliada ao longo do tempo, através de modelos qualitativos, observando-se o relacionamento entre os eventos e os diversos condicionantes considerados importantes na sua deflagração, representados na forma de mapas. Alternativamente, este trabalho utilizou uma abordagem relativamente inovadora, quando enfoca o desenvolvimento e aplicação de metodologia baseada em modelos estocásticos ou estatísticos,

* Dr. em Geociências e Meio Ambiente - IGCE - UNESP Rio Claro – SP – Brasil Prof. Associado do Departamento de Geografia da UFRN, Natal – RN - Brasil. e-mail: pcaraujo@rn.gov.br

** Docente do Departamento de Geologia Aplicada – IGCE - UNESP Rio Claro – SP – Brasil. e-mail: psriedel@rc.unesp.br

recurso disponível em Sistemas de Informação Geográfica (SIGs) para analisar, manipular e produzir dados e informações utilizados na avaliação e quantificação de evidências consideradas importantes na suscetibilidade a escorregamentos translacionais, através de uma modelagem baseada nos dados.

A modelagem baseada em dados é aquela cujos parâmetros são estimados através de cálculos estatísticos, executados em locais selecionados para treinamento, através da avaliação dos relacionamentos espaciais do fenômeno, sendo, portanto menos subjetiva do que aquelas baseadas no conhecimento. Nesse trabalho, foi utilizada a modelagem Pesos de Evidência (*"Weights of evidence"*), que possibilita a combinação de várias evidências do processo, representadas por mapas, através de uma formulação log-linear das regras de Bayes.

Através dessa técnica de inferência espacial, denominada aproximação bayesiana, objetivou-se obter um produto que mostrasse numericamente a suscetibilidade à ocorrência de escorregamentos, através de valores de probabilidade. Esse método pressupõe que exista independência condicional entre os planos de informação e as evidências que são os escorregamentos e essa independência é testada e avaliada. Os processos modelados correspondem principalmente aos escorregamentos translacionais, que são muitas vezes associados às corridas de massa, uma vez que muitos movimentos inicialmente deflagrados à montante, transformam-se nas corridas em regiões à jusante (Fernandes et al., 2001). A modelagem através da probabilidade condicional bayesiana foi adaptada para esse tipo de estudo, uma vez que tem sido amplamente utilizada para avaliar as potencialidades de ocorrências minerais em diversos locais, inclusive no Brasil.

A área de trabalho faz parte do Município de São Sebastião, situado sobre embasamento cristalino, de idade pré-cambriana, que se dispõe ao longo de toda faixa litorânea do Estado de São Paulo, formado por rochas gnáissico - migmatíticas e metassedimentos associados, corpos graníticos, bem como sedimentos cenozóicos pré-atuais e atuais, depositados ao longo da planície costeira, depósitos associados a encostas que são os de tálus e colúvios e planícies aluvionares. Estruturalmente, tem-se uma foliação bastante variável, que está subordinada às grandes estruturas regionais, com direção geral NE e mergulhos que caem ora para SE, ora para NW. Ocorrem também áreas onde a foliação tem direção SSE (Maffra, 2000).

Com relação à geomorfologia, a região enquadra-se na Serra do Mar, que corresponde à escarpa montanhosa de transição entre o Planalto Atlântico e Baixada Litorânea. Esta escarpa apresenta-se ora abrupta e festonada, ora em espigões lineares digitados e acompanha, de forma geral, as direções estruturais e geográficas SW/NE, com desníveis topográficos da ordem de 1000m e declividades acentuadas (Santos, 2004).

A vegetação desempenha importante papel na estabilidade das encostas da Serra do Mar (Prandini et al. 1976; IPT, 1988), seja ao impedir a ação direta da chuva, diminuindo seu poder erosivo ou ao agregar os solos superficiais através de sua malha de raízes. Na área de estudo predomina vegetação de floresta pluvial tropical de encosta, pertencente à Mata Atlântica, que vem sendo alterada pela intervenção humana, favorecendo a ocorrência de escorregamentos. A Mata Atlântica está atualmente restrita a áreas que não permitiram a ocupação humana, sendo esse o caso da porção da área de estudo que apresenta grande declividade, porém, em várias porções da área de menor declividade, há feições de desmatamento e de alteração da mata original. Há também áreas onde se desenvolvem vegetações de mangue, de várzea, de restinga, além de áreas de pastagem e culturas, principalmente de banana.

2 – OBJETIVO

Esse trabalho teve como objetivo principal gerar uma carta da suscetibilidade a escorregamentos translacionais, colaborando também no estudo das corridas de massa, muitas vezes associadas a estes processos, através da modelagem bayesiana “pesos de evidência” (WOFE), aplicada sobre mapas selecionados como evidências dos movimentos gravitacionais de massa na região de São Sebastião, Serra do mar paulista.

3 – ESTABELECIMENTO DA HIPÓTESE ORIENTATIVA

Adotou-se a seguinte hipótese orientativa de trabalho:

- A partir de eventos conhecidos, representados por cicatrizes de escorregamentos, pode-se estimar a suscetibilidade a movimentos de massa, e gerar cartas quantificadas, através de métodos estocásticos, disponíveis em Sistemas de Informação Geográfica, baseados em uma probabilidade condicional, ou seja, probabilidade de ocorrer um novo evento, dado que este já ocorreu antes e dado à existência de vários condicionantes do meio físico, denominados nesse trabalho pela palavra “evidências”.

4 – PROCESSOS ATUANTES

Em concordância com a maioria dos autores que estudaram os movimentos gravitacionais de massa na Serra do Mar, aqui é assumido que os principais eventos que ocorrem na área são os escorregamentos translacionais, amplamente descritos e discutidos na literatura (Wolle e Carvalho, 1989; Amaral, 1997; IPT, 1998; Fernandes et al., 2001), e as corridas de massa, que ocorrem associadas às cavidades topográficas, que funcionam como armazenadoras do material instabilizado. Existem várias propostas de classificação de movimentos de massa no mundo, com destaque para Varnes (1958 e 1978); Hutchinson (1988); IAEI (1990), entre outros. Adotou-se neste trabalho a classificação simplificada de Guidicini e Nieble (1978), que divide os movimentos de massa em escoamentos, que são representados por rastejos e corridas, e os escorregamentos, que podem ser translacionais ou rotacionais. Esta mesma classificação foi também adotada por Fernandes et al. (2001).

No que diz respeito às corridas de massa, Dietrich & Montgomery (1998) descrevem que este processo ocorre normalmente em regiões com relevo montanhoso, como é o caso da área de estudo, associado às porções côncavas do relevo, que podem ser uma cavidade, depressão ou qualquer recorte na vertente que possa armazenar os depósitos de detritos e propõem o termo hollow, para estas feições côncavas, que constituem zonas de convergência hidrológica e de detritos. Estas feições e sua associação com o processo de corrida são relatadas em trabalhos de Avelar e Coelho Neto, 1992; Fernandes e Amaral, 1996; Fernandes et al., 2001.

Na ausência do fluxo superficial, o transporte do solo em baixas declividades se dá, em sua maioria, devido aos processos dependentes da inclinação (Dietrich, et al., 1995; Heimsath et al., 1997). Por causa dessa dependência entre o transporte e a inclinação do terreno, todo vale, cavidade, depressão, ou um outro recorte qualquer na vertente, mesmo sutil, serão locais onde vai acontecer uma convergência no transporte do solo ou detritos.

Na paisagem montanhosa, onde a topografia é representada por solos acamadados em cumes e vales, os escorregamentos rasos envolvem tipicamente o manto do solo e ocorrem geralmente

próximos do limite solo-substrato rochoso. Estes escorregamentos podem acontecer em baixas declividades e viajar a curtas distâncias antes de depositar o material e se acomodar na vertente ou em uma canaleta próxima. Outros escorregamentos podem acontecer em uma área com inclinação suficientemente íngreme para fazer com que o fluxo viaje a grandes distâncias e, nesse trajeto, incorporar material depositado anteriormente em canaletas que estão na sua trajetória, depositando uma grande quantidade de material rio abaixo.

Dietrich et al. (1982) propuseram um modelo em que vales não canalizados submetem-se a um ciclo da acumulação de colúvio, interrompido de tempos em tempos pela descarga periódica devido a escorregamentos. Esse modelo propõe que esses eventos são governados basicamente pelos fatores topográficos através da inclinação. Outras contribuições importantes a respeito dos processos da estabilidade em função da inclinação e modelagem desses processos associados com a topografia do cume e do vale podem ser encontradas em Sidle (1992) e Wu & Sidle (1995).

5 – DEFINIÇÃO DOS CONDICIONANTES (EVIDÊNCIAS) UTILIZADOS NA ANÁLISE

A seleção dos condicionantes utilizados para as análises, tratados aqui pelo termo “evidências”, foi feita, a princípio, com base em critérios que determinam quais temas são importantes para os processos sob análise, levando-se em conta as características da área de estudo e os trabalhos de diversos autores, encontrados na literatura, que discutem o tema, com suas mais variadas formas de abordagem.

Esses indicadores foram definidos para que fossem submetidos a análises estatísticas, a fim de determinar o potencial de escorregamento de áreas ao longo do tempo e, finalmente, para serem integrados e manipulados em ambiente de Sistemas de Informação Geográfica, para gerar um tipo de produto, que pode ser utilizado para elevar a consistência na definição de riscos associados a escorregamentos, ou outros tipos de riscos, bem como subsidiar planos de ocupação e gerenciamento de uso da terra.

Dessa forma, com base na análise crítica dos condicionantes e dos processos a serem modelados, foram selecionados os seguintes condicionantes (evidências), considerados os mais relevantes: Geologia; Cobertura da terra; Exposição das vertentes; Geomorfologia, aqui abordada separadamente em forma das encostas, Declividade, unidades e feições Geomorfológicas.

Foram considerados os mesmos condicionantes, tanto para os escorregamentos, quanto para corridas de massa, assumindo sempre que o peso de um determinado fator possa ser maior ou menor, dependendo do processo e que podem existir importantes diferenças quanto aos intervalos de declividade, à forma das vertentes e à feição geomorfológica em que ambos se desenvolvem. Além disso, em muitas situações, a fonte dos detritos que se acumulam nas concavidades do relevo é exatamente o material proveniente de escorregamentos translacionais que ocorrem à montante. Desta forma, os dois processos têm uma forte associação (Fernandes et al., 2001; Gramani, 2001).

6 – LEVANTAMENTO DOS DADOS DISPONÍVEIS

No que diz respeito aos dados disponíveis, foi feito um levantamento das informações básicas, para a seleção da documentação a ser utilizada na execução deste trabalho. Além da bibliografia, esta documentação consta de:

- Folhas Topográficas Bairro Jaraguá, São Sebastião, Bairro Pontal da Cruz e Bairro do Arpoar na escala 1:10.000 do Plano Cartográfico do Estado de São Paulo.
- Mapa geológico, na escala 1:50.000, modificado de Maffra (2000);
- Mapa geomorfológico, escala 1:50000, modificado de IG-SMA (1996);
- Mapa de cobertura vegetal, escala 1:50000 (Crepani & Medeiros, 2000);
- Fotos aéreas, escalas 1:10000 (1987) e 1:45000 (1977)
- Imagens do Landsat 7 ETM+, órbita 218.76, de 26/06/2000
- Software Arc View 3.2 (Esri)

7 – ESTUDO DE CASO

A área escolhida para este estudo é um trecho do Município de São Sebastião, litoral norte do Estado de São Paulo, incluindo a área urbana e a porção norte deste Município (Figura 1).

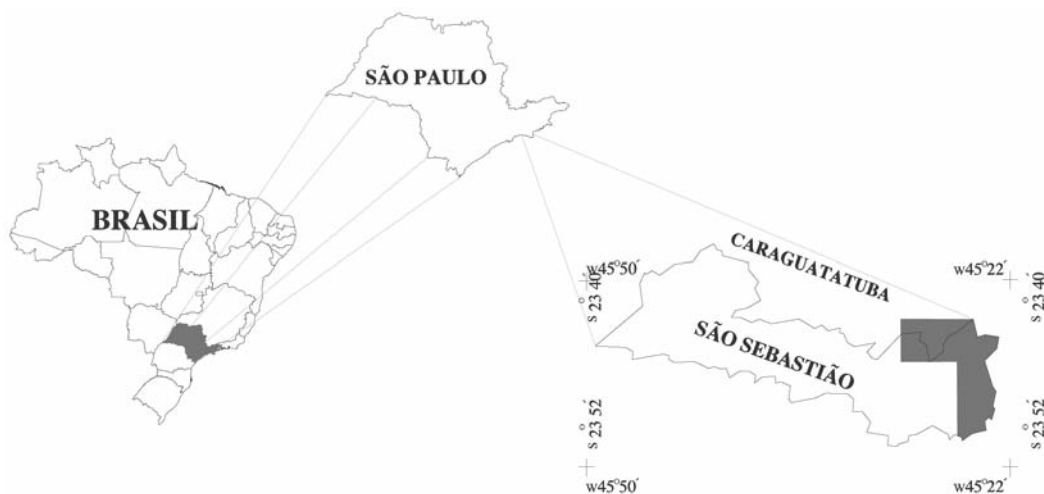


Fig. 1 – Localização da área.

Os critérios utilizados para a escolha da área levaram em consideração os seguintes fatores: Número expressivo de cicatrizes de escorregamentos que correspondem às evidências do processo (probabilidade a priori), obtido através do banco de dados do Plano Preventivo da Defesa Civil (PPDC) da Defesa Civil; disponibilidade de dados, como bases topográficas confiáveis em escala de detalhe 1:10.000, mapas geológicos, geomorfológicos e de vegetação; disponibilidade de fotografias aéreas e imagens de satélite. Além disso, trata-se de uma área de grande interesse econômico, com atividades comerciais, industriais, portuárias, com um imenso potencial turístico.

8 – O MÉTODO BAYESIANO

A metodologia adotada neste trabalho é baseada no método estocástico de Bayes ou aproximação bayesiana. Este método utiliza uma estrutura probabilística para um grupo de dados, onde um dos principais conceitos em que se baseia essa aproximação é a idéia de probabilidade a priori e a posteriori.

O modelo foi descrito e adotado por Agterberg (1989), Bonham-Carter (1989 e 1994), aplicado à prospecção mineral, para avaliar a favorabilidade a ocorrências minerais e adotado neste trabalho para avaliar a suscetibilidade a escorregamentos translacionais, associando-os às corridas de massa.

Nesse trabalho, a probabilidade será designada pela letra P, evento (escorregamento) pela letra E, e a evidência pela letra B. Dessa forma, a probabilidade de ocorrer um evento “E”, dado à presença de uma evidência “B” pode ser expressa pela seguinte expressão, que mostra a probabilidade condicional:

$$P(E | B) = P(E \cap B) / P(B) \quad (1)$$

Onde, $P(E | B)$ = Probabilidade condicional de ocorrer o evento “E”, dado a evidência “B” e $P(E \cap B)$ = Área de interseção entre o plano de informação eventos “E” e a evidência “B”.

Dois conceitos são amplamente utilizados para avaliação da favorabilidade, que são a razão de necessidade e razão de suficiência dos atributos considerados como evidências. A condição de necessidade considera que a validade de uma proposição B somente é possível se a proposição A for válida, e a condição de suficiência significa que a validade de uma proposição B é satisfeita pela validade de uma proposição A.

Soares et al (2002) ponderam que uma variável será considerada altamente necessária se, na sua ausência, o evento não ocorrer e será altamente suficiente se, na sua presença, ocorrer o evento, de maneira que é esperado que o evento ocorra onde um conjunto de evidências diagnósticas apresentarem os mais altos graus de necessidade e suficiência ou mais altos contrastes. Chung et al. (1995) argumentam que para que uma evidência seja considerada um critério diagnóstico, é importante que ela cumpra os critérios de necessidade e suficiência, caso contrário, nas situações em que a evidência indica favorabilidade em pequeno grau, a mesma pode ser considerada apenas como um critério permissivo.

8.1 – Independência condicional ou estatística

A independência condicional entre mapas é uma premissa assumida quando dois ou mais planos de informação são combinados através do modelo bayesiano. Isso significa que os planos de informação, que representam as evidências utilizadas na análise, sejam estatisticamente independentes, com relação aos eventos ou ocorrências, ou seja, o conhecimento prévio de um evento não deve afetar a probabilidade de outro evento. Matematicamente, isso pode ser expresso através da seguinte maneira: Dados dois eventos, A e B, a independência existe quando:

$$P(A | B) = P(A) \quad (2)$$

Onde,

$P(A|B)$ = probabilidade condicional de A, dado B e,

$P(A)$ = probabilidade marginal de A

Segundo Bonham-Carter (1994), na prática a independência condicional é sempre violada em algum grau e a probabilidade de que isto ocorra cresce, à medida que novos mapas de evidências são incorporados ao modelo. Quando é aplicada à análise nos dados, essa condição pode ser checada através de testes estatísticos para mostrar a magnitude do problema e apontar quais os mapas que estão causando maior dificuldade, afim de que eles possam ser rejeitados, combinados ou modificados para reduzir o problema.

O mapa de favorabilidade, baseado na análise probabilística, é adversamente afetado se, nos locais onde ocorrem os eventos conhecidos, a presença de um padrão favorável à deflagração do evento em um mapa de evidência for estatisticamente dependente da presença de um padrão favorável à ocorrência do evento em outro mapa de evidência. A consequência da violação da independência estatística é a superestimação ou a subestimação das probabilidades posteriores durante a combinação dos mapas de evidências, resultando em frequências estimadas para os novos eventos notadamente superiores ou inferiores à frequência dos eventos observados, tanto nas áreas de maior, como nas áreas de menor probabilidade.

É importante avaliar o grau de violação da independência estatística, para que sejam tomadas as providências adequadas a fim de corrigir, caso necessário, as distorções no mapa de favorabilidade final.

Quando relações de probabilidade são estimadas subjetivamente por um especialista, não é possível testar a independência condicional. Este, sabendo que o problema existe, simplesmente interpreta os resultados de acordo com os seus critérios de avaliação.

8.2 – Reclassificação binária

Segundo Bonham-Carter (1994), a utilização de mapas binários na modelagem, além de conferir maior robustez estatística às estimativas, torna mais fácil a interpretação dos resultados.

O processo de conversão de mapas multi classes para a forma binária pode ser efetuado tanto subjetivamente, usando o julgamento do analista, quanto estatisticamente, determinando-se um limiar de corte que maximize a correlação espacial entre a evidência resultado da reclassificação binária e o mapa contendo os eventos (verdades de campo).

O parâmetro normalmente utilizado para determinar estatisticamente o limiar de corte, denominado contraste (C_w). Esse parâmetro é utilizado normalmente para se evitar os extremos, onde poucas classes podem ser consideradas favoráveis ou, de forma oposta, muitas classes, o que pode acontecer com o julgamento subjetivo realizado por especialistas.

8.3 – Pesos de evidência

O método quantitativo Pesos das Evidências (Weights-of-evidence) utiliza uma formulação log-linear do Teorema de Probabilidade de Bayes, para combinar padrões em planos de informação, com o objetivo de prognosticar a distribuição de objetos espacialmente referenciados para dar suporte a uma determinada hipótese.

Essa metodologia combina dados espaciais de diversas fontes para descrever e analisar interações, fornecer suporte para responsáveis pelas decisões, e para fazer modelos preditivos. O método foi desenvolvido originalmente para uma aplicação não espacial no diagnóstico médico por Spiegelhalter & Knill-Jones (1984). Nesta aplicação, a evidência consistiu em um conjunto de sintomas, e a hipótese a ser testada era se o paciente tinha a doença x . Para cada sintoma, um par de pesos foi calculado, um para a presença do sintoma e um outro para a ausência do sintoma. O valor dos pesos dependeu da associação medida entre o sintoma e a ocorrência da doença em um grupo grande de pacientes. Os pesos poderiam então ser usados para estimar a probabilidade que um paciente novo começasse a contrair a doença, baseada na presença ou a ausência dos sintomas e o inverso seria verdadeiro para pesos negativos.

Seguindo o mesmo raciocínio, o serviço Geológico dos Estados Unidos da América (U. S. Geological Survey) e o Serviço Geológico do Canadá (Geological Survey of Canadá) desenvolveram uma extensão do *software* Arc View GIS, sob a coordenação de Bonham-Carter, denominada Arc WOFI (Bonham-Carter, 1994; Bonham-Carter et al., 1998). Essa extensão usa um método quantitativo denominado “pesos de evidência”, adaptado para mapear o potencial mineral usando Sistemas de Informação Geográfica e consiste na combinação de vários padrões binários para prognosticar outro padrão binário.

Segundo Franca Rocha et al (2001), a modelagem “Pesos das Evidências” (Weights of Evidence) está entre os métodos mais sofisticados de modelagem em SIG, envolvendo um enfoque estatístico com componentes probabilísticos, possibilitando uma interpretação dos relacionamentos espaciais que vão muito além das detectadas por meios tradicionais, utilizados normalmente na análise dos dados.

Essa modelagem usa a associação estatística entre ocorrências constatadas e as possíveis evidências que condicionem ou que sejam indícios da ocorrência do fenômeno sob análise. Por exemplo, pode-se citar a associação entre ocorrências minerais e as evidências que seriam o tipo de rocha, as medidas geoquímicas ou geofísicas, para se determinar os pesos, que podem ser positivos ou negativos. O produto final é um mapa resultante da combinação dos pesos das variáveis, o qual expressa a probabilidade de uma determinada célula do mapa conter a ocorrência.

Trata-se de modelagem bastante utilizada em mineração, para a geração de mapas de favorabilidade a ocorrências minerais, e utilizada por Araújo (2004) e Araújo et al. (2004), para uma aplicação em Geologia de Engenharia.

9 – PROCEDIMENTOS EFETUADOS

Para aplicação do modelo, foram combinados vários condicionantes/evidências para gerar um produto que mostre valores, como a probabilidade de ocorrer um escorregamento. Os dados de entrada são representados por pontos conhecidos, que são as cicatrizes de escorregamento cadastradas e constituem as amostras da população estudada.

A seleção dos condicionantes que fizeram parte das análises, tratados aqui pelo termo “evidências” foi feita, a princípio, com base em critérios que determinam quais temas são importantes para o processo, levando em conta as características da área de estudo e os trabalhos de diversos autores, encontrados na literatura, que discutem o tema, com suas mais variadas formas de abordagem.

Esses condicionantes foram definidos para que fossem submetidos a análises estatísticas, a fim de determinar sua influência relativa no potencial de escorregamento ao longo do tempo. Isso foi obtido através da integração e manipulação em ambiente de Sistemas de Informação Geográfica, com abordagem quantitativa, que pode ser utilizada para elevar a consistência na definição de riscos associados a escorregamentos, além de outros tipos de riscos, bem como subsidiar planos de ocupação e gerenciamento de uso da terra.

Com base na análise crítica dos condicionantes e dos processos a serem modelados, foram selecionados os seguintes condicionantes (evidências): Geologia, Cobertura da terra e Geomorfologia incluindo aqui as unidades e feições geomorfológicas, a forma das encostas, declividade e exposição das vertentes. Foram utilizados os mesmos condicionantes tanto para escorregamentos quanto para corridas, uma vez que foram consideradas as corridas derivadas de escorregamentos à montante, de forma que os dois eventos estão diretamente correlacionados. A principal diferença diz respeito à análise dos dados. Como exemplo, pode-se citar o caso dos condicionantes declividade e

geomorfologia, pois se, por um lado, as altas declividades e escarpas retilíneas estão relacionadas aos escorregamentos, constituindo a zona de geração de material, as declividades menores e escarpas em anfiteatro estão relacionadas às corridas de massa, pois representam a zona de acumulação de material.

Em termos operacionais, inicialmente foi estabelecida uma probabilidade a priori, baseada nas cicatrizes conhecidas, através de uma análise estatística condicional e os valores da probabilidade a posteriori, por sua vez, foram computados dentro do ambiente do SIG, como resposta à análise probabilística.

Foi efetuado o cálculo estatístico da medida da associação espacial entre as classes dos diversos mapas de evidências dos eventos de escorregamentos, e posterior conversão dessas medidas em pesos. O objetivo dessa etapa foi proceder ao cálculo da medida da associação espacial entre as classes de cada mapa de evidência/condicionante e um conjunto de pontos que representam as cicatrizes de escorregamentos, que são eventos previamente conhecidos na área e são usados no treinamento, como indicadores da probabilidade prévia. O cálculo dos ponderadores, que são os pesos das evidências ($W+$ e $W-$), variâncias e probabilidades posteriores, foi executado no Arc-Info.

Posteriormente, os vários planos de informação utilizados na análise foram reclassificados e transformados em mapas binários, onde aparecem apenas as classes: favorável ao desenvolvimento do processo, que assume o valor 1 e desfavorável, à qual é atribuído o valor 0 (zero). O limiar de corte para a transformação dos mapas em binários pode ser obtido tanto através do julgamento subjetivo de especialistas, como através de técnicas estatísticas, que medem a correlação espacial entre as ocorrências e as evidências, tal como o parâmetro de contraste (Cw), utilizado neste trabalho.

Foi também verificada a independência condicional entre os mapas de evidência. Para isto, foram utilizados os testes pareado e global para a avaliação do grau de violação da independência condicional envolvendo os condicionantes do processo, representados na forma de mapas. Dependendo do resultado dessa análise, devem ser efetuados os devidos ajustes, combinando ou eliminando mapas, para que esse pressuposto do método seja respeitado. Sabe-se que é muito difícil, na prática, conseguir um ajuste que implique na total independência, de forma que se faz necessário à aplicação de testes estatísticos para se verificar em que grau ocorreu a violação desse importante pressuposto.

A etapa seguinte foi relativa à integração entre os mapas de evidências binários reclassificados e ponderados. A partir dos mapas binários gerados, realizou-se uma tabulação cruzada entre as evidências e os planos de informação contendo as ocorrências (verdades de campo). Através desse procedimento, gerou-se uma matriz de dados, onde cada pixel corresponde à interseção das classes dos mapas de evidências com o plano de informação que contém os eventos. Esses valores de correlação são utilizados para a obtenção dos valores de probabilidade a posteriori.

Por último, efetuou-se a avaliação das tabelas de variâncias, para produzir os mapas das incertezas da modelagem, que normalmente estão associadas ao processo de cálculo de pesos de evidência, bem como são decorrentes da eventual ausência de dados em algum local da área de estudo.

10 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

10.1 – Cálculo dos pesos das evidências (condicionantes)

O cálculo dos pesos das evidências produz tabelas que mostram os relacionamentos espaciais entre o evento, no caso as cicatrizes de escorregamentos, e as várias classes de cada um dos mapas das evidências consideradas. Os valores dos pesos de evidência variam em função da razão entre a

área dos escorregamentos em uma classe do mapa e a área total da ocorrência desses eventos, normalizada pela razão entre a área da classe e a área total do mapa. Assim, nos mapas onde os eventos são mais frequentes que o esperado pelo cálculo da chance, o ponderador é positivo (W+) e onde os eventos são menos frequentes que o esperado pelo cálculo da chance, o ponderador é negativo (W-), em área sem dados os ponderadores, tanto positivos quanto negativos, recebem valores iguais a zero e em locais onde os eventos são aleatórios, sem nenhuma correlação espacial, $(W+) = (W-) = \text{zero}$.

As tabelas apresentadas a seguir mostram os resultados dos cálculos dos ponderadores para os mapas de evidência modelados. As três primeiras colunas descrevem as classes de cada mapa de evidência, a área de cada classe e o número de eventos por classe, que no caso são as cicatrizes de escorregamentos. As quatro colunas seguintes apresentam o ponderador de evidência positivo (W+), seu desvio padrão $s(W+)$, o ponderador de evidência negativo (W-), seu desvio padrão $s(W-)$, a oitava coluna mostra o contraste (C), que é dado pela diferença entre os ponderadores da evidência, ou seja, $C = (W+) - (W-)$, a última coluna $[C/s(C)]$ representa o contraste normalizado em relação ao seu desvio padrão, esse parâmetro é um indicador do grau de incerteza, que normalmente está associado à medida.

Legenda dos títulos das colunas: W+ = peso de evidência positivo, W- = peso de evidência negativo, C = contraste $(W+) - (W-)$, $s(W+)$ e $s(W-)$ = desvio padrão dos pesos de evidência positivos e negativos, respectivamente, e $(C/s(C))$ é o contraste normalizado pelo seu desvio padrão, de acordo com o teste t de Student. Essa legenda vale para todas as tabelas de pesos de evidência.

Analisando-se a Tabela 1, verifica-se que os maiores contrastes, logo a maior correlação espacial com os eventos, aparecem na classe 3, seguida pela classe 5, que equivalem às unidades do embasamento cristalino, como rochas graníticas fácies biotita e migmatíticas, enquanto as demais unidades aparecem com uma importância secundária, apresentando baixos valores de correlação espacial. Esses valores estão associados mais intimamente aos escorregamentos translacionais, muito comuns na área.

Tabela 1 – Pesos de evidências calculados para o mapa geológico da área de estudo. A área das classes representa a área de ocorrência da própria unidade geológica. A linha em negrito representa as classes que apresentam os maiores contrastes, selecionados para a generalização ou reclassificação binária.

Classe	Área (km²)	Legenda	Pontos	W+	s(W+)	W-	s(W-)	C	S(C)	C/s(C)
1	5038,94	Depósitos Fluviais	0							
2	3573,41	Dep. de tálus e colúvios	8	-1,22	0,71	0,04	0,0862	-1,26	0,71	-1,77
3	4592,35	Granito 1	27	1,13	0,19	-0,15	0,0954	1,29	0,22	5,98
4	16372,83	Gnaiss	20	-0,44	0,22	0,10	0,0925	-0,54	0,24	-2,24
5	27700,11	Migmatito	73	0,33	0,11	-0,28	0,1251	0,60	0,17	3,53
6	1725,95	Sed. Litorâneos Atuais	0							
7	9142,58	Sed. Marinhos sub atuais	2	-2,16	0,71	0,12	0,09	-2,29	0,71	-3,21
8	3945,60	Granito 2	7	-0,07	0,38	0,01	0,09	-0,07	0,39	-0,19
9	13,23	Milonito	0							

Granito 1 - Fácies rica em biotita do Granito Guacá

Granito 2 - Fácies leucocrática com granada do Granito Guacá

Tabela 2 – Pesos de evidências calculados para o mapa com as unidades e feições geomorfológicas da área. A área das classes é categórica e as linhas destacadas indicam as classes selecionadas para reclassificação binária.

Classe	Área (km²)	Legenda	Pontos	W+	s(W+)	W-	s(W-)	C	S(C)	C/s(C)
1	16,02	Morros e morrotes litorâneos	56	0,61	0,13	-0,27	0,11	0,89	0,17	5,09
2	4,35	Morros e morrotes do planalto	6	-0,32	0,41	0,02	0,09	-0,34	0,42	-0,81
3	2,58	Tálus e colúvios	9	0,61	0,33	-0,03	0,09	0,64	0,35	1,85
4	6,37	Planície flúvio-Marinha	0							
5	11,29	Planície marinha	0							
6	14,42	Escarpas em espigões digitados	9	-1,11	0,33	0,15	0,09	-1,27	0,35	-3,68
7	2,95	Escarpas retilíneas	12	-1,02	0,71	0,03	0,09	-1,05	0,71	-1,47
8	14,14	Escarpas em Anfiteatros	45	0,52	0,15	-0,18	0,10	0,70	0,18	3,83

Esses resultados expostos na Tabela 2 mostram que, com relação às unidades e feições geomorfológicas, os maiores valores de correlação espacial medidos pelo contraste aparecem na classe 1, que equivale à unidade morros e morrotes litorâneos, seguido bem de perto pela classe 8, representada pelas escarpas em anfiteatro, com valor bem significativo, correspondendo aos locais onde normalmente ocorrem os movimentos gravitacionais do tipo corridas de massa e a classe 3, equivalente à ocorrência de tálus e colúvios, onde também se desenvolvem escorregamentos e corridas. Cabe salientar que as escarpas foram subdivididas em três grupos, pela sua importância na área e pela diferente associação de cada uma das formas de escarpa aos processos abordados.

Tabela 3 – Pesos de evidências calculados para o mapa de cobertura da terra. A área das classes é categórica e as linhas em destaque indicam as classes selecionadas para reclassificação binária.

Classe	Área (km²)	Legenda	Pontos	W+	s(W+)	W-	s(W-)	C	S(C)	C/s(C)
1	15,93	Áreas sem vegetação	54	0,58	0,14	-0,25	0,11	0,83	0,18	4,75
2	34,57	Vegetação de Floresta	32	-0,72	0,18	0,39	0,10	-1,11	0,20	-5,48
3	3,87	Vegetação de Floresta alterada	7	-0,05	0,38	0,00	0,09	-0,05	0,39	-0,13
4	11,92	Vegetação Secundária	38	0,52	0,16	-0,14	0,10	0,66	0,19	3,47
5	1,61	Desmatamento	2	-0,43	0,71	0,01	0,09	-0,43	0,71	-0,61
6	0,09	Restinga	0							
7	0,47	Várzea	0							
8	0,03	Mangue	0							
9	3,57	Pastagem/Culturas	4	-0,53	0,50	0,02	0,09	-0,55	0,51	-1,09

Com relação à legenda adotada, cabe salientar que foram englobadas na classe Áreas sem Vegetação, a área urbana e seus entornos, os afloramentos rochosos e demais áreas de solo exposto, excluindo as áreas de floresta desmatada. Na classe Vegetação de Floresta estão as áreas da floresta pluvial tropical de encosta, pertencente à Mata Atlântica. Na classe Floresta alterada, estão incluídas as áreas com sinais de alteração na floresta original e na classe Vegetação Secundária, as áreas onde a floresta original foi retirada e nova vegetação se desenvolveu, já como Desmatamento, estão as áreas originalmente de Floresta, onde a mesma foi retirada e ainda não se desenvolveu uma vegetação secundária.

Considerando-se a evidência cobertura da terra, os maiores valores de contraste, conforme os dados da Tabela 3, aparecem nas áreas desprovidas de vegetação, incluindo as áreas urbanas, seguidas por áreas com vegetação secundária.

Observa-se, segundo a Tabela 4, que o maior valor de contraste foi atribuído às declividades situadas nas áreas com valores superiores a 45° e o segundo intervalo selecionado para reclassificação, situa-se entre 10° e 20°. As maiores declividades representam as áreas sujeitas aos escorregamentos translacionais, enquanto que o intervalo de 10° a 20° provavelmente reflete os locais onde o material proveniente de escorregamentos à montante se deposita, vindo depois a escorregar, em episódios de alta pluviosidade, constituindo a corrida de massa.

Tabela 4 – Pesos de evidências calculados para o mapa de declividade. A área das classes é categórica e as linhas em destaque indicam as classes selecionadas para reclassificação binária.

Classe	Área (km²)	Legenda	Pontos	W+	s(W+)	W-	s(W-)	C	S(C)	C/s(C)
1	23,51	0 – 10°	19	-0,86	0,23	0,25	0,09	-1,10	0,25	-4,46
2	14,41	10 - 20°	40	0,38	0,16	-0,12	0,10	0,50	0,19	2,67
3	18,48	20 - 30°	38	0,08	0,16	-0,03	0,10	0,11	0,19	0,56
4	13,38	30 - 45°	29	0,13	0,19	-0,03	0,10	0,16	0,21	0,78
5	2,27	> = 45°	11	0,94	0,30	-0,05	0,09	0,99	0,31	3,14

Tabela 5 – Pesos de evidências calculados para o mapa de exposição de vertentes. A área das classes é categórica e as linhas em destaque indicam as classes selecionadas para reclassificação binária.

Classe	Área (km²)	Legenda	Pontos	W+	s(W+)	W-	s(W-)	C	S(C)	C/s(C)
1	5,47	-1	6	-0,52	0,41	0,03	0,09	-0,55	0,42	-1,32
2	5,59	Norte	6	-0,54	0,41	0,03	0,09	-0,58	0,42	-1,38
3	11,80	Nordeste	15	-0,37	0,26	0,06	0,09	-0,43	0,27	-1,57
4	11,38	Leste	24	0,13	0,20	-0,03	0,10	0,16	0,23	0,72
5	10,36	Sudeste	28	0,38	0,19	-0,08	0,10	0,46	0,21	2,18
6	4,47	Sul	11	0,29	0,30	-0,02	0,09	0,31	0,31	0,98
7	3,18	Sudoeste	5	-0,16	0,45	0,01	0,09	-0,17	0,46	-0,36
8	5,96	Oeste	11	0,00	0,30	0,00	0,09	0,00	0,31	0,00
9	13,89	Noroeste	27	0,05	0,19	-0,01	0,10	0,07	0,22	0,30
-99	0,00		0							

Com relação à exposição de vertentes, nota-se na Tabela 5 que os maiores valores de contraste estão associados às faces voltadas para sudeste, apresentando coincidência, com o sentido de caimento da foliação para SE. Secundariamente, aparecem as encostas voltadas para sul e leste, no caso das faces voltadas para leste, há também coincidência com a foliação de direção SSE, identificada por Maffra (2000). As faces voltadas para sul, por sua vez, embora não apresentem relação com as estruturas geológicas mais relevantes, são encostas submetidas a menor insolação solar, permanecendo úmidas por maior período de tempo, o que favorece a alteração intempérica e o desenvolvimento do solo a ser mobilizado.

Através da Tabela 6, observa-se que as vertentes de forma retilínea e côncava apresentam os maiores valores de contraste, sendo, portanto as que apresentam maior correlação espacial com os eventos registrados na área. Os valores elevados para as encostas de forma côncava estariam relacionados às concavidades do terreno, que mesmo sutis, funcionam como locais onde o material proveniente dos escorregamentos à montante se acumula, ocasionando as posteriores corridas de massa pela ação da gravidade. As encostas retilíneas, por sua vez, estão relacionadas aos escorregamentos planares. São consideradas, aqui, tanto as zonas de geração, quanto de acumulação de material, pois o material gerado à montante pelos escorregamentos deposita-se à jusante, gerando as futuras corridas de massa. Os dois processos são bastante correlacionados.

Tabela 6 – Pesos de evidências calculados para o mapa de forma das vertentes. A área das classes é categórica e as linhas em destaque indicam a classes selecionadas para reclassificação binária.

Classe	Área (km²)	Legenda	Pontos	W+	s(W+)	W-	s(W-)	C	S(C)	C/s(C)
1	18,31	Côncava	69	0,69	0,12	-0,41	0,12	1,09	0,17	6,39
2	12,09	Retilínea	50	0,78	0,14	-0,27	0,11	1,05	0,18	5,91
3	26,11	Convexa	17	-1,07	0,24	0,32	0,09	-1,39	0,26	-5,36
4	15,55	Planície	1	-3,39	1,00	0,24	0,08	-3,62	1,00	-3,61
-99	0,04		0							

10.2 – Reclassificação binária

Para a generalização ou reclassificação dos mapas, utilizou-se um critério estatístico para transformar as classes dos vários mapas das evidências em somente duas classes: favorável e desfavorável e o parâmetro utilizado para esta reclassificação foi a medida do contraste, considerando que as evidências estão presentes ou ausentes para cada mapa, para um dado valor de correlação. Vale lembrar que não apenas a classe de máximo contraste foi selecionada para o corte na reclassificação, mas também as classes que apresentaram um valor de contraste próximo deste, conforme as tabelas discutidas anteriormente, de modo a tornar a análise mais representativa.

10.3 – Avaliação da independência condicional

Através da aplicação do teste qui-quadrado (pareado), foi avaliado se houve violação na independência condicional entre os mapas de evidências utilizados na modelagem e, em caso positivo, em que grau isso ocorreu, afim de que pudessem ser efetuados os devidos ajustes, seguidos por uma nova modelagem. A Tabela 7 mostra os resultados da aplicação do teste qui-quadrado.

Examinando-se a Tabela 7, verifica-se que, com 1 grau de liberdade, já que os mapas modelados são binários, e ao nível de confiança de 98%, todos os valores da tabela estão abaixo de 5,4, que é o

Tabela 7 – Resultados do teste Qui-quadrado (pareado) aplicado sobre os temas utilizados na análise.

TEMA	Declividade	Exposição	Forma das Vertentes	Geomorfologia	Vegetação
Geologia	0,18	0,03	0,02	3,30	1,14
Declividade		0,50	0,35	0,22	0,58
Exposição			0,15	3,75	0,01
Forma das vertentes				0,74	2,01
Geomorfologia					2,86

valor tabelado do teste qui-quadrado. Dessa forma, com base nessas observações, a hipótese nula de independência condicional não é rejeitada a este nível. Mesmo considerando agora um nível de significância menor, de 95%, e mantendo 1 grau de liberdade, os valores da tabela, com uma única exceção, ainda estão abaixo do valor tabelado do qui-quadrado (X^2) que no caso é 3,8, o que sugere que não há problema acentuado no que diz respeito à independência condicional. Os resultados apresentados demonstram que não houve acentuada violação da independência condicional, logo a modelagem para geração do mapa final de suscetibilidade pode ser realizada sem necessidade de ajustes.

Como observou Bonham-Carter (1994), na prática é muito difícil que as evidências sejam totalmente independentes, de forma que uma certa dependência sempre ocorre na natureza.

10.4 – Integração dos mapas binários e geração do mapa de suscetibilidade a escorregamentos

A aplicação da modelagem WOFE na série de mapas binários, conforme descrição feita acima, produziu uma tabela que sumariza as estatísticas resultantes (Tabela 8). Nesta tabela, aparecem os valores resultantes dos cálculos dos ponderadores (W+ e W-), o contraste (C) e o parâmetro contraste normalizado pelo desvio padrão C/s(C), que mostra o grau de confiança nas estimativas da suscetibilidade. Nesta tabela, é importante se observar o contraste, que é a medida da correlação espacial entre o evento (escorregamento) e a evidência, de forma que quanto maior esse valor, maior é a associação espacial entre eles e, ao contrário, quanto menor o contraste, menor vai ser a associação espacial entre o evento e o mapa da evidência considerado.

Tabela 8 – Resultados dos cálculos dos ponderadores de evidências (W+ e W-). Os mapas com maiores contrastes representam os temas que tiveram maior influência na modelagem e os maiores valores do parâmetro C/s(C) mostram o maior grau de confiança nas estimativas.

EVIDÊNCIAS	W+	W-	CONTRASTE (C)	CONFIANÇA C/s(C)
Geologia	-0,78	0,52	1,30	6,49
Declividade	-0,15	0,39	0,54	2,92
Exposição	-0,18	0,33	0,51	2,87
Forma das vertentes	-1,06	0,79	1,85	8,86
Geomorfologia	-1,21	0,63	1,84	7,83
Cobertura da terra	0,54	-0,63	1,17	6,24

Os valores mais elevados de contraste foram obtidos para a evidência forma das vertentes, seguido das evidências geomorfologia, litologia, vegetação e declividade, sendo, portanto esses os itens que mais contribuíram de acordo com a análise realizada. A evidência exposição de vertentes foi a que menos contribuiu para o mapa final, tendo, portanto uma importância secundária. Com relação ao grau de confiança, de uma maneira geral, os mapas com maiores contrastes também apresentam elevados graus de confiabilidade, pois os maiores valores correspondem justamente à forma da vertente e geomorfologia.

A Figura 2 mostra o mapa de suscetibilidade a escorregamentos, baseado na distribuição final da probabilidade posterior, estimada pelo método “pesos de evidência”(WOFE).

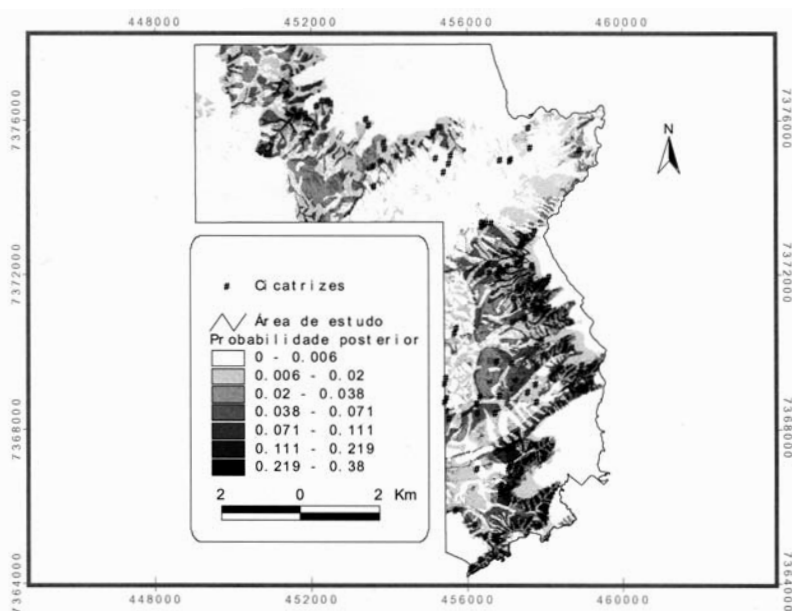


Fig. 2 – Mapa de suscetibilidade a escorregamentos, obtido através da modelagem WOFE.

Analisando-se o mapa mostrado acima, pode-se observar que a probabilidade máxima que é de 0.395, alcança cerca de 21 vezes a densidade média de escorregamentos mapeados na área, que é dada pelo valor da probabilidade prévia de 0.0184. Grande parte das cicatrizes mapeadas ocorre exatamente nas áreas de maior suscetibilidade, onde estão os maiores valores de probabilidade posterior, mas também é possível observar a ocorrência de escorregamentos em áreas de média e até de mais baixa suscetibilidade.

10.5 – Considerações sobre erros e mapas de incertezas associadas ao método

Os testes de independência condicional através da estatística do qui-quadrado, aplicados aos mapas utilizados na modelagem, mostraram que não houve uma significativa violação desse importante preceito metodológico, como foi visto anteriormente. A não violação da independência condicional foi comprovada também com a aplicação do teste global de independência condicional, que avalia o ajuste global da modelagem, sendo posterior a ela. Apesar de não ser um teste formal, como avaliou Bonham-Carter (1994), esse teste bastante simples é empregado para constatar se há

ou não discrepância entre o número de ocorrências existentes e o número prognosticado. Em geral, se o número de eventos prognosticados for muito maior do que o número observado, deve-se assumir que há pouca representatividade dos dados, levando-se em conta que todos os eventos foram corretamente mapeados.

O cálculo desse índice resultou numa razão de 0,78 significando que foram prognosticados cerca de 171 escorregamentos, 38 a mais do que o observado o que comprova que não houve violação acentuada da independência condicional, pressuposto importante do método. Quanto ao grau de incerteza da modelagem, para produção dos mapas de suscetibilidade, a Figura 3 apresenta os resultados obtidos pela divisão do mapa de probabilidade posterior pelo seu desvio padrão devido às incertezas totais, como descrito antes.

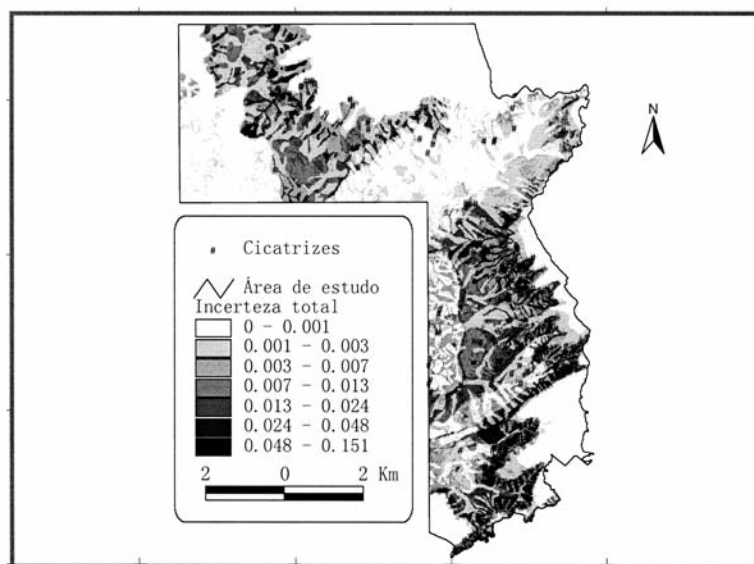


Fig. 3 – Mapa de avaliação do grau de incerteza total da modelagem WOFI.

Os resultados mostrados nesse mapa indicam que de maneira geral, há uma correspondência entre as áreas de maior suscetibilidade ou probabilidade posterior e as áreas de maior incerteza, de modo que quanto maior a probabilidade, maior o grau de incerteza da medida.

11 – CONCLUSÕES

Com relação aos condicionantes utilizados na modelagem, os valores de contraste, obedeceram à seguinte ordem decrescente de importância: forma das vertentes, seguida das evidências geomorfologia, vegetação, geologia, declividade e finalmente exposição das vertentes.

Os valores do parâmetro $C/s(C)$, que mede o grau de confiança nas estimativas da suscetibilidade efetuadas, mostram uma certa equivalência entre a confiabilidade dos vários condicionantes utilizados na modelagem, de maneira que aqueles com os maiores contrastes foram também os que apresentaram maior confiabilidade.

A partir do mapa de suscetibilidade gerado, que mostra a probabilidade posterior da ocorrência de escorregamentos, observa-se que as áreas com maior suscetibilidade ocorrem em locais onde já aconteceram escorregamentos, mas também existem cicatrizes em locais de baixa suscetibilidade e são observados valores elevados de probabilidade em locais onde ainda não aconteceu nenhum escorregamento.

Com relação à modelagem baseada no método Bayesiano, utilizada no presente trabalho, esta permite que se façam algumas considerações importantes, que comprovam o seu potencial de aplicação:

- Trata-se de um modelo objetivo, que parte das próprias ocorrências para gerar resultados e estimar as probabilidades;
- Por se tratar de um modelo baseado nos dados, pode ser extremamente melhorado com observações de campo e com a aquisição de novos dados, isso se considera como sendo uma grande vantagem;
- Apresenta grande versatilidade em prognosticar eventos futuros, partindo de observações, para inferir as causas dos processos, o que diminui a necessidade de estudos extensivos e monitoramentos controlados por longos períodos de tempo, pois oferece a possibilidade de resposta a algumas indagações, quais sejam:
- Que fatores apresentam maior controle sobre os processos em uma determinada área de interesse?
- Chegando-se à conclusão de quais fatores controlam as instabilizações, quais deles estão ligados mais diretamente aos eventos, ou seja, qual a importância relativa de cada um deles?
- Qual a fração de uma determinada área está sujeita a instabilizações frente às condições existentes nessa área?

Assim, os métodos inferenciais podem fornecer ferramentas que permitem uma maior compreensão dos processos naturais, especialmente quando não se tem condições de utilizar medidas diretas, caras e dispendiosas e, muitas vezes, inviáveis. Enfatiza-se aqui que o método auxilia na compreensão da relação entre os vários condicionantes com o desencadeamento do processo, porém a sua utilização para produção de cartografia de risco necessitaria de técnicas adicionais comprobatórias, bem como trabalhos de campo.

Apesar das vantagens e do grande potencial de aplicação, a modelagem baseada no método bayesiano também possui limitações, uma delas diz respeito à exigência de independência condicional entre os dados, o que nem sempre é possível obter, uma segunda limitação não seria particularidade da análise bayesiana, mas estaria relacionada a todos os modelos baseados nos dados (*data driven*), que é a grande sensibilidade à qualidade dos dados e isso é sempre um problema enfrentado, de difícil solução.

Considerando-se todas as possíveis falhas inerentes ao próprio método em si, erros operacionais, erros por não se ter considerado outros parâmetros, que poderiam ser também muito importantes, erros de posicionamento e transferência de dados que influem na posição dos eventos, conclui-se que a abordagem quantitativa, utilizando recursos da geotecnologia, pode ser de grande utilidade para prognosticar adequadamente áreas sujeitas a movimentos gravitacionais de massa, de forma que pode ser uma excelente alternativa a ser utilizada no planejamento para prevenção dos riscos associados a processos geológicos, pois permite, através da análise integrada de uma série de dados, mapear e fornecer uma visão espacial tanto da abrangência dos eventos instalados, quanto aquelas áreas com maior risco potencial.

11 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agterberg, F.P. (1989) Systematic approach to dealing with uncertainty of geoscience information in mineral exploration. Proceedings 21st Symposium on Applications of computers and operations research in the mineral industry, Colorado, Cap. 18: 165-178p.
- Amaral, C. (1997) Landslides disasters management in Rio de Janeiro. Bell (ed.) Landslides. Balkema, Rotherdam: 1339-1343.
- Avelar, A.S.; Coelho Neto, AL. (1992) Fraturas e desenvolvimento de unidades geomorfológicas côncavas no médio vale do Paraíba do Sul. Revista Brasileira de Geociências 22, n.2, p.222-227.
- Araújo, P.C. (2004) Avaliação da suscetibilidade a escorregamentos: uma abordagem probabilística. 172f. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Rio Claro, SP.
- Araújo, P.C.; Riedel, P.S.; Sartoro, J.; Vedovello, R.; Tominaga, L.K.; Brollo, M.J.; Tavares, R. (2004) Analysis of susceptibility to gravitational mass flows using a spatial reference model based on conditional probability. Proceedings 9th International Symposium on Landslides, Rio de Janeiro, IAEG, p251-256.
- Bonham-Carter, G.F. (1989) Comparison of Image Analysis and Geographic Information Systems for Integrating Geocientific Maps. Agterberg, F.P. et. al. (eds.), Statistical Analysis in the Earth Sciences. Ottawa, Geological Survey of Canadá. p.141-155.
- Bonham-Carter, G.F. (1994) Geographic Information System for Geoscientists: Modelling With GIS. Ottawa, Pergamon.
- Bonham-Carter, G.F.; Agterberg, F.P.; Wright, D.F. (1998) Integration of geological datasets for gold exploration in Nova Scotia. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, v.54, p. 1585-1592.
- Chung, C.F., Fabbri, A., Van Westen, C. J. (1995). Multivariate regression analysis for landslide hazard zonation. Carrara & Guzzetti (eds.), Geographical Information System in assessing natural hazards. Kluwer Academic Publishers, p.107-133.
- Crepani, E.; Medeiros, J.S. de (2000) Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento aplicados ao estudo da vulnerabilidade a movimentos de massa no Município de São Sebastião- SP. Anais 9º Simposio Latinoamericano de Percepción Remota, Misiones, Argentina.
- Dietrich, W.E.; Dunne, T.; Humphrey, N.F.; Reid, L.M. (1982) Construction of sediment budgets for drainage basins. F.J. Swanson, R.J. Janda, T. Dunne & D.N. Swanso (eds.) Sediment Budgets and Routing in Forested Drainage Basins. General Technical Report PNW-141, Forest Service, U.S. Dept. of Agriculture, p. 5 - 23.
- Dietrich, W.E.; Reiss, R.; Hsu, M.L.; Montgomery, D.R. (1995) A process-based model for colluvial soil depth and shallow landsliding using digital elevation data. Hydrol. Proces., v. 9, p. 383-400.
- Dietrich, W.E.; Montgomery, D.R. (1998) A digital terrain model for mapping shallow landslide potencial. NCASI. Disponível em: <http://www.socrates.berkeley.edu/geomorph/shalstab/>
- Fernandes, N.F.; Amaral, C.P. (1996) Movimentos de massa: uma abordagem geológico- geomorfológica. Guerra, A.J.T. e Cunha, S.B. (orgs.). Geomorfologia e Meio Ambiente., Bertrand, Rio de Janeiro: 123-194.

- Fernandes, N.F.; Guimarães, R.F.; Gomes, R.AT.; 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 suscetíveis. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v.2, n.1, p51-71.
- Franca-Rocha, W.J.S., Bonham-Carter, G., Misi, A. (2001) Estimando a favorabilidade para recursos minerais na Bacia de Irecê pelos métodos “Lógica Nebulosa” e “Pesos das Evidências”. *Sitientibus*, n.22, p.27 – 54.
- Gramani, M.F. (2001) Caracterização geológico-geotécnica das corridas de detritos (Debris Flows) no Brasil e comparação com alguns casos internacionais. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Solos, EPUSP – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.372p.
- Guidicini, G., Nieble, C. M. (1978) Estabilidade de taludes naturais e de escavação. São Paulo: Edgard Blücher; Ed. da Universidade de São Paulo, 1978. 170p.
- Heimsath, A.M., Dietrich, W.E., Nishizumi, K., Finkel, R.C. (1997) The soil production function and landscape equilibrium. *Nature*, 388, 358-361.
- Huthchinson, J. N. (1988) General report: morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to Geology and Hydrology. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LANDSLIDES, 5, 1988. Rotterdam. Proceedings, Rotterdam: A. A. Balkema. 1988. V.1, p.3-35.
- IAEG – International Association of Engineering Geology (1990) Suggested Nomenclature for Landslides. *Bulletin IAEG*, v. 41, p. 13-16, 1990.
- IG-SMA (1996) Carta de risco a movimentos de massa e inundação do município de São Sebastião. Instituto Geológico, São Paulo, Relatório técnico.
- IPT (1988) Programa Serra do Mar: Carta Geotécnica da Serra do Mar nas folhas de Santos e Riacho Grande. Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo, Relatório IPT nº 26504.
- Maffra, C. de Q.T. (2000) Geologia estrutural do embasamento cristalino na região de São Sebastião, SP: evidências de um domínio transgressivo. Dissertação de Mestrado em Geoquímica e Geotectônica, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, SP.113p.
- Prandini, F.L; Guidicini, G, Bottura, J.A; Ponçano, W.L; Santos, A.R. (1976) Atuação da Cobertura Vegetal na Estabilidade de Encostas: Uma Resenha Critica. Mossoró, 22 p.
- Santos, A. R. dos. (2004). A grande barreira da Serra do Mar: da trilha dos Tupiniquins à Rodovia dos Imigrantes. São Paulo: O nome da Rosa, 2004. 122p.
- Sidle, R.C. (1992) A theoretical model of the effects of timber harvesting on slope stability. *Water Resource Research* 28(7): 1987-1910.
- Soares, P.C; Soares, A.P. e Fiori, A.P. (2002) Raciocínio probabilístico aplicado à suscetibilidade de escorregamentos: Um estudo de caso em campo Largo, Paraná, Brasil. *Boletim Paranaense de Geociências* 51, p.59-76. Editora UFPR.
- Spiegelhalter, D.J., e Knill-Jones, R.P. (1984) Statistical and knowledge-based approaches to clinical decision-support systems, with an application in gastroenterology: *J. Royal Stat. Soc., A*, Part 1, p. 35-77.

- Varnes, D. J. (1958) Landslides types and processes. Eckel, E.B. (ed.) Landslides and Engineering Practice. National Academy of Science, Washington :20-47.
- Varnes, D. J. (1978) Slope movement types and processes . Schuster, R.L. & Krizek, R.J. (eds.) Landslides analysis and control. National Academy of Science, Washington:11-33.
- Wolle, C.M.; Carvalho, C.S. (1989) Deslizamentos em encostas da serra do Mar- Brasil. Solos e Rochas 12, 27-36.
- Wu, W.; Sidle, R.C. (1995) A distributed slope stability model for steep forested basins. Water Resources Research 31, 2097-2110.