

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Campus de Rio Claro

ANÁLISE DA SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS: UMA ABORDAGEM PROBABILÍSTICA

Paulo César de Araújo

Orientadora: Profa. Dra. Paulina Setti Riedel

Tese de Doutorado elaborada junto ao Curso de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente – Área de Concentração em Geociências e Meio Ambiente para obtenção do Título de Doutor em Geociências e Meio Ambiente

Rio Claro (SP)

2004

624.151 Araújo, Paulo César de.
A663an Análise da suscetibilidade a escorregamentos : uma
abordagem probabilística / Paulo César de Araújo. -- Rio
Claro : [s.n.], 2004
172 f. : il., figs., tabs.

Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista,
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Orientador: Paulina Setti Riedel

1. Geologia de engenharia. 2. Geotecnologia.
3. Probabilidade condicional. 4. Pesos de evidência.
I. Título.

Ficha catalográfica elaborada pela STATI – Biblioteca da UNESP
Campus de Rio Claro/SP

Comissão Examinadora

- aluno(a) -

Rio Claro, _____ de _____ de _____

Resultado: _____

Dedico esse trabalho a minha família,
pelo carinho, amor e incentivo.

Agradecimentos

Gostaria de expressar os meus sinceros agradecimentos a todos as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para realização deste trabalho, em especial:

À Profa. Dra. Paulina Setti Riedel pela oportunidade, ensinamentos, pela dedicada orientação e pela confiança depositada.

Ao Instituto Geológico nas pessoas de Ricardo Vedovello, Maria José Brollo, Lídia Tominaga, Renato Tavares e Jair Santoro, que gentilmente cederam material utilizado no trabalho.

À Profa. Dra. Iandara Alves Mendes pelas sugestões.

À Denise Rossini Penteado e Cristiane Lopes Rodrigues pelo apoio na elaboração dos mapas de ocupação urbana.

Aos Companheiros Alessandra C. Corsi, Luis Mancini, Shirley C. Santos, Anna Paula Costa, Jorge L. Feola, Eymar L. Silva, Mirna Neves, Ana Cândida Prado e Eduardo Bernardes pela colaboração.

Aos amigos e companheiros de longa data Maria O. L. Sousa, José A. Nogueira, Johnson Nogueira e Iramaia F. Braga pela amizade, dedicação e apoio.

À Susana Corvalan por ter sido companheira durante a fase de conclusão deste trabalho.

Aos amigos e colegas da pós-graduação Sérgio H. Almeida, Eduardo Kelusodi, Leila Perdoncini, Cláudia L. Moura, César Martinelli, Tácito Walber, Cynthia R. Duarte, Ivaldo Trindade, Júlio C. Arrais, Paulo S. Nascimento e Jacqueline Feitosa pela agradável convivência em todos esses anos.

Às secretárias da pós-graduação Rosemeide Franchin e Laura Narcizo.

Ao CNPq pelo auxílio de bolsa de doutorado.

SUMÁRIO

ÍNDICE	i
ÍNDICE DE TABELAS	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
RESUMO.....	viii
ABSTRACT	ix
1. INTRODUÇÃO	1
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	5
3. MATERIAIS E PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	56
4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	89
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	107
6. CONCLUSÕES	149
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	152

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 GENERALIDADES	1
1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA.....	4
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	5
2.1 MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA.....	5
2.1.1 Tipos de movimentos gravitacionais de massa	6
2.1.1.1 Quedas	6
2.1.1.2 Tombamentos.....	6
2.1.1.3 Escorregamentos.....	7
2.1.1.4 Escoamentos	8
2.1.1.5 Movimentos de massa complexos.....	9
2.1.2 Condicionantes dos movimentos de massa.....	10
2.1.2.1 Geologia	13
2.1.2.2 Geomorfologia	13
2.1.2.3 Aspectos climáticos/pluviosidade	14
2.1.2.4 Vegetação	15
2.1.2.5 Ação antrópica.....	17
2.1.3 Principais classificações dos movimentos de massa	18
2.1.4 Risco associado a escorregamentos	26
2.2 CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA VOLTADA A RISCO	32
2.3 CARTOGRAFIA DIGITAL, SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA E MODELOS QUANTITATIVOS APLICADOS A ESCORREGAMENTOS	34
2.4 MÉTODO BAYESIANO.....	40
2.4.1 Introdução.....	40
2.4.2 Descrição do método bayesiano.....	41
2.4.3 Independência condicional ou estatística.....	48
2.4.3.1 Teste qui – quadrado.....	51
2.4.3.2 Teste global	52
2.4.4 Reclassificação binária	53
2.4.5 Pesos de evidência.....	53

3. MATERIAIS E PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	56
3.1 SELEÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	57
3.2 ESTABELECIMENTO DE HIPÓTESE ORIENTATIVA	58
3.3 DEFINIÇÃO DOS CONDICIONANTES (EVIDÊNCIAS) UTILIZADOS NA ANÁLISE	58
3.4 LEVANTAMENTO DOS DADOS DISPONÍVEIS	59
3.5 ELABORAÇÃO DA BASE DE DADOS EM SIG.....	60
3.5.1 Criação do mapa base.....	61
3.5.2 Digitalização dos mapas temáticos.....	61
3.5.3 Edição dos mapas digitalizados.....	62
3.5.4 Entrada de dados numéricos	63
3.5.5 Escolha do software	63
3.5.6 Modelagem dos dados	64
3.5.6.1 Modelagem de dados – implementação da modelagem WOFE	65
3.5.7 Elaboração de mapas temáticos	69
3.5.7.1 Mapa de áreas com escorregamentos	69
3.5.7.2 Elaboração de mapas derivados da altimetria	70
3.5.7.2.1 Modelo Numérico do Terreno	71
3.5.7.3 Carta de energia do relevo	76
3.5.7.5 Mapa de forma das vertentes	85
3.5.7.4 Elaboração dos mapas da área de expansão urbana	85
4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	89
4.1 GEOLOGIA.....	89
4.1.1 Caracterização litológica	90
4.1.1.1 Embasamento cristalino	87
4.1.1.2 Sedimentos inconsolidados	92
4.1.2 Considerações sobre a geologia estrutural.....	94
4.2 GEOMORFOLOGIA.....	97
4.3 VEGETAÇÃO.....	99
4.4 PROCESSOS ATUANTES	100
4.5.1 Escorregamentos translacionais de solo.....	101
4.5.2 Queda de detritos	102
4.6 HISTÓRICO DA OCUPAÇÃO HUMANA	104

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	107
5.1 MODELAGEM WOFE	107
5.1.1 Evidências utilizadas na modelagem	107
5.1.1.1 Forma das vertentes.....	108
5.1.1.2 MNT e produtos derivados	109
5.1.1.3 Carta de energia do relevo	112
5.1.2 Implementação da modelagem WOFE	113
5.1.2.1 Cálculo dos pesos das evidências.....	114
5.1.2.2 Reclassificação binária	120
5.1.2.3 Avaliação da independência condicional considerando declividade e excluindo carta energia do relevo.....	126
5.1.2.4 Avaliação da independência condicional considerando energia do relevo e excluindo a declividade	130
5.1.2.5 Integração dos mapas binários e geração do mapa de suscetibilidade a escorregamentos	132
5.1.2.6 Considerações sobre erros e mapas de incertezas associadas ao método	136
5.1.2.7 Considerações sobre a resolução espacial do mapa de escorregamentos	139
5.2 AVALIANDO O CRESCIMENTO URBANO DO MUNICÍPIO	141
5.2.1 Área urbana em 1977	141
5.2.2 Área urbana em 1988	142
5.2.3 Área urbana em 2000	143
5.2.4 Evolução da expansão urbana entre os anos de 1977 e 2000	144
6. CONCLUSÕES	149
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	152

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Principais agentes e causa dos escorregamentos. (Adaptado de Guidicini & Nieble, 1976).....	11
Tabela 2.2 - Ação dos fatores que influenciam nos movimentos gravitacionais de massa. (Varnes, 1978).....	12
Tabela 2.3 - Sistematização dos movimentos de massa, de acordo com Sharpe (1938).....	19
Tabela 2.4 - Classificação dos movimentos gravitacionais de massa, segundo Freire (1965) modificada por Guidicini & Nieble (1984).....	21
Tabela 2.5 - Classificação dos movimentos de massa proposta por Vargas (1999).....	22
Tabela 2.6 - Classificação simplificada dos movimentos de encostas, segundo Varnes (1978), modificada por Cruden & Varnes (1996)	23
Tabela 2.7 - Classificação dos movimentos de massa proposta por Wolle (1988).....	24
Tabela 2.8 - Classificação dos movimentos de massa. Segundo IPT (1991) e Augusto Filho (1992).....	25
Tabela 2.9 - Processos geológicos causadores de acidentes no Brasil (Cerri & Amaral, 1998).....	31
Tabela 3.1 - Síntese do método das hipóteses progressivas. (SANTOS, 1984).....	56
Tabela 3.2 - Parâmetros usados na modelagem pesos das evidências.	66
Tabela 3.3 - Classes de dissecação horizontal do relevo obtidas de maneira semi-automática através de <i>buffers</i>	79
Tabela 3.4 - Critérios morfométricos para o estabelecimento de classes de energia do relevo. Mendes (1993).	83
Tabela 3.5 - Intervalos de reclassificação para geração da carta de energia do relevo.	84
Tabela 5.1 - Pesos de evidências calculados para o mapa geológico. ...	115
Tabela 5.2 - Pesos de evidências calculados para o mapa com as unidades geomorfológicas.	116
Tabela 5.3 - Pesos de evidências calculados para o mapa de cobertura vegetal. ...	117
Tabela 5.4 - Pesos de evidências calculados para o mapa de declividade.....	117

Tabela 5.5 - Pesos de evidências calculados para o mapa de exposição de vertentes.	118
Tabela 5.6 - Pesos de evidências calculados para o mapa hipsométrico.	119
Tabela 5.7 - Pesos de evidências calculados para o mapa de forma das vertentes.	119
Tabela 5.8 - Pesos de evidências calculados para o mapa de energia do relevo...	120
Tabela 5.9 - Resultados do teste Qui-quadrado (pareado) aplicado sobre os temas utilizados na análise, considerando a declividade.	130
Tabela 5.10 - Resultados do teste qui-quadrado (pareado) aplicado sobre os temas utilizados na análise, considerando a energia do relevo.	131
Tabela 5.11 - Resultados dos cálculos dos ponderadores de evidências (W+ e W-), considerando a declividade.	132
Tabela 5.12 - Resultados dos cálculos dos ponderadores de evidências (W+ e W-), considerando a energia do relevo.	133
Tabela 5.13 – Relação entre o tamanho da célula que representa o evento e os valores calculados de probabilidade a priori e do desvio padrão	140

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 - Localização e situação da área de estudo.	57
Figura 3.2 - Mapa de escorregamentos da área de estudo.....	70
Figura 3.3 - Etapas de construção da carta de dissecação horizontal do relevo.	78
Figura 3.4 - Trecho da carta de dissecação horizontal do relevo.	80
Figura 3.5 - Etapas de construção da carta de dissecação horizontal do relevo.	81
Figura 3.6 - Trecho da carta de dissecação vertical do relevo.	82
Figura 4.1 - Mapa geológico da área de estudo (Modificado de Maffra, 2000).	97
Figura 4.2 - Mapa Geomorfológico da área de estudo (Modificado de IG, 1996).....	99
Figura 4.3 - Mapa de cobertura vegetal da área de estudo (Crepani & Medeiros, 2000).....	100
Figura 5.1 - Mapa de forma das vertentes	108
Figura 5.2 - Detalhe do Modelo Numérico de Terreno.	109
Figura 5.3 - Mapa de declividade obtido da área de estudo.....	110
Figura 5.4 - Mapa mostrando os ângulos de exposição de vertentes.	111
Figura 5.5 - Mapa hipsométrico.....	112
Figura 5.6 - Carta de energia do relevo.....	113
Figura 5.7 - Gráfico de variação dos pesos de evidências positivo e negativo (W^+ e W^-), contraste e contraste normalizado pelo teste t de student para o mapa geológico.	121
Figura 5.8 - Padrão binário de evidências para a evidência “mapa litológico”.	122
Figura 5.9 - Padrão binário de evidências para a evidência “mapa geomorfológico”.	123
Figura 5.10 - Padrão binário de evidências para a evidência “mapa de cobertura vegetal”	124
Figura 5.11 - Padrão binário de evidências para a evidência “mapa de declividade”	125
Figura 5.12 - Padrão binário de evidências para a evidência “mapa de exposição de vertentes”	126
Figura 5.13 - Padrão binário de evidências para a evidência “mapa hipsométrico”.....	127
Figura 5.14 - Padrão binário de evidências para a evidência “mapa de forma das vertentes”.	128

Figura 5.15 - Padrão binário de evidências para o tema mapa de energia do relevo reclassificado de acordo com os contrastes máximos.....	129
Figura 5.16 - Mapa de suscetibilidade a escorregamentos considerando o mapa de declividade	134
Figura 5.17 - Mapa de suscetibilidade considerando a carta de energia do relevo.	135
Figura 5.18 - Mapa de avaliação do grau de incerteza total da modelagem WOFÉ considerando o mapa de declividade.	137
Figura 5.19 - Mapa de avaliação do grau de incerteza total da modelagem WOFÉ considerando a carta de energia do relevo.	138
Figura 5.20 - Comparação entre a variação da probabilidade posterior e a variação do grau de incerteza total.	139
Figura 5.21 - Ocupação urbana no ano de 1977.....	141
Figura 5.22 - Ocupação urbana no ano de 1988.....	142
Figura 5.23 - Ocupação urbana no ano de 2000.....	143
Figura 5.24 - Mapa mostrando a evolução da expansão urbana entre os anos de 1977 e 1988.	145
Figura 5.25 - Mapa mostrando a evolução da expansão urbana entre os anos de 1988 e 2000.	146
Figura 5.26 - Mapa mostrando a evolução da expansão urbana entre os anos de 1977 e 2000.	147
Figura 5.27 - Relação entre os escorregamentos ocorridos e a área urbana no ano de 2000.	148

RESUMO

Os escorregamentos são os principais processos ligados à dinâmica externa, que estão em desenvolvimento nas escarpas da Serra do Mar, o que tem despertado grande interesse científico e motivado o desenvolvimento de trabalhos visando o entendimento de seus mecanismos, pois estão intimamente relacionados a situações de risco. Contemplando as mais variadas formas de abordagens, os trabalhos desenvolvidos nessa região tem um ponto em comum: As análises, em sua grande maioria, são feitas através de modelos analógicos, que utilizam medidas diretas e apresentam resultados qualitativos. No presente trabalho, apresenta-se uma abordagem quantitativa que utiliza recursos da geotecnologia para gerar mapas de suscetibilidade a escorregamentos através do método “pesos das evidências” (WOFE), baseado em probabilidade condicional ou Bayesiana. Esse método é utilizado para medir as relações espaciais entre eventos já ocorridos e os mapas de evidências associados aos condicionantes desses eventos. Um pressuposto importante desse método é a independência condicional entre as evidências, sendo sua avaliação feita através dos métodos estatísticos qui-quadrado e teste global. O método proposto foi aplicado em uma área do Município de São Sebastião, litoral norte do Estado de São Paulo, utilizando mapas com padrões binários. A obtenção dos mapas binários obedeceu ao critério de contraste máximo, que é a medida de correlação espacial entre os escorregamentos e as evidências. A avaliação dos resultados obtidos indica que a abordagem utilizada apresenta potencial para aplicação em estudos sobre suscetibilidade a escorregamentos e avaliações sobre risco, em função do uso de probabilidade condicional.

Palavras-chave: suscetibilidade a escorregamentos, geotecnologia, probabilidade condicional, pesos de evidência.

ABSTRACT

Landslide is the main process linked to external dynamic that take place in the Mar Mountain Range (*Serra do Mar*) escarpments. It has been of great scientific interest and has motivated researches that aim the comprehension of its mechanisms. The approaches have been diversified, but with a common sense: the analyses are mainly made through analogical models, using direct measurements and showing qualitative results. Alternatively, this work shows a quantitative approach, using geotechnology resorts that give raise to landslides susceptibility maps through the “weights of evidence” method (WOFE). This method, based in the conditional or bayesian probability, is useful to measure the spatial correlations among events and evidence maps, which are selected as factors that influence the occurrence of these events. The conditional independence between the evidence maps is an important purpose of the WOFE method, and the evaluation is made through the overall test and chi-square statistic methods. The method was applied in an area of the São Sebastião County, in the North Coast of the São Paulo State, Brazil, using binary maps. The binary maps were the result of the reclassification using the maximum contrast criterion, which is the measurement of the spatial correlation between landslides and evidences. The evaluation of the results show that the approach presents potential for application in studies on landslide susceptibility and evaluations on risk, based of the use of conditional probability.

Key words: Landslide susceptibility, geotechnology, conditional probability, weights of evidence.

1. INTRODUÇÃO

1.1 Generalidades

Os movimentos gravitacionais de massa, objeto desse trabalho, constituem o principal processo do meio físico em desenvolvimento nas encostas da Serra do Mar paulista. Esta área alia uma condição geomorfológica propícia a esses processos com um intenso processo de ocupação. Tratam-se de áreas de grande interesse econômico, apresentando muitas demandas ligadas à implantação de empreendimentos imobiliários voltados a atividades de turismo e lazer, bem como atividades portuárias, industriais e de comércio e serviços, o que têm contribuído para um aumento da população. O auge do crescimento da urbanização no litoral paulista deu-se na década de setenta, em consonância com o que ocorreu em praticamente todo o Estado de São Paulo.

O litoral norte, por ser uma área de grande interesse econômico, principalmente voltado às atividades de turismo e lazer, apresenta um alto grau de ocupação. Esse processo de crescimento, aliado às atividades que naturalmente estão associadas a essa ocupação, tem alterado as características naturais do meio ambiente o que, em algumas regiões, acarreta um quadro de intensa degradação ambiental. Dentre os principais reflexos desta ocupação está a poluição e contaminação dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos e do solo pela disposição inadequada dos resíduos sólidos, saturação do solo por águas servidas, ocupação de áreas com declividades elevadas. Tais características favorecem o desencadeamento de movimentos de massa, o que coloca em risco tanto pessoas como bens configurando um sério problema tanto do ponto de vista social quanto econômico.

O Município de São Sebastião, área do presente trabalho, teve o seu crescimento favorecido pela implantação da rodovia Rio Santos (BR-101) e pelas melhorias na rodovia dos Tamoios (SP-99), o que ocorreu a partir de meados da década de setenta. Apesar de ser junto com Ilhabela, um dos dois municípios ao longo de todo litoral do estado que atualmente não possui verticalização, segundo dados da prefeitura local, cresce a uma taxa de 7% ao ano, sem que sua infraestrutura seja compatível com esse crescimento.

As regiões do município mais adequadas à ocupação foram destinadas para o uso turístico, o que praticamente levou a população de baixa renda a ocupar as áreas inadequadas a construção, com baixo ou nenhum interesse turístico. Tal fato acarretou uma intensificação das situações de risco a movimentos de massa, ou mesmo à inundação, por todo o município.

Ao longo de todo século XX a região litorânea do Estado de São Paulo despertou grande interesse científico, podendo-se encontrar trabalhos expressivos distribuídos ao longo desse período, contudo a partir dos anos 80 esse interesse foi intensificado, o que possibilitou a produção de uma grande quantidade de trabalhos de cunho geológico/geotécnicos, voltados à caracterização de processos de instabilização das encostas da Serra do Mar, trabalhos esses não apenas de caráter acadêmico, como também com o objetivo de fornecer suporte aos órgãos de defesa civil na prevenção de situações de risco e para orientar políticas públicas de ordenamento e planejamento do uso da terra. Neste sentido, vários trabalhos foram ou estão sendo realizados por instituições como Instituto Geológico - Secretaria do Meio Ambiente do estado de São Paulo (IG-SMA) e Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) em parcerias com universidades, visando, entre outras coisas, desenvolvimento de bancos de dados georreferenciados com informações geoambientais, para atender especialmente planejadores, gerenciadores e executores de políticas públicas.

Dentre os muitos trabalhos desenvolvidos que enfocam os escorregamentos e sua natureza, a maioria, para não dizer a quase totalidade, o fazem de forma qualitativa como pode ser visto na bibliografia especializada, trabalhos esses que têm mostrado bons resultados. Contudo, verifica-se ser necessário oferecer uma nova alternativa no que diz respeito à caracterização e tratamento deste processo.

Independentemente de a abordagem ser qualitativa ou quantitativa, salienta-se a importância da compreensão do processo que é o objeto de estudo e da interação dos diversos fatores que influem no seu desencadeamento quais sejam pluviometria, uso e ocupação, parâmetros topográficos, geológicos e geomorfológicos, etc.

Considerando que na área registra-se um número considerável de movimentos gravitacionais de massa, é importante que se desenvolvam pesquisas visando à obtenção de produtos que mostrem estatisticamente a probabilidade de ocorrência desses eventos, contando com o apoio dos recursos tecnológicos que

estão disponíveis. Nesse sentido, busca-se a aplicação de métodos que venham a privilegiar esse tipo de abordagem.

A necessidade de levantamentos, estudos e sistematização de informações sobre o meio físico, bem como a possibilidade de oferecer uma forma de abordagem que se junte as demais já existentes motivou a realização dessa pesquisa. Esta utilizou uma abordagem inovadora, quando enfoca o desenvolvimento e aplicação de metodologia baseada em modelos estocásticos ou estatísticos, 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.

Apesar das facilidades e do potencial de aplicação, não se pode esquecer que ainda se esbarra em dificuldades como, por exemplo, a escassez de dados primários e a qualidade dos dados existentes, sendo isso sem dúvida um fator limitante na análise.

A modelagem de dados em SIG pode ser conduzida através de dois grupos de processos (REDY & BONHAM-CARTER, 1991) que são a modelagem baseada nos dados (“*Data Driven*”) e a modelagem baseada no conhecimento (“*Knowledge driven*”).

A modelagem baseada no conhecimento geralmente é feita por sistemas especialistas e o processo de seleção e atribuição dos parâmetros utilizados no modelo é guiado pela experiência e julgamento do executor. Os exemplo mais clássicos desse tipo de modelagem são as operações de lógica booleana, amplamente utilizada em análise espacial.

A modelagem baseada nos dados, por sua vez, 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 a anterior. Exemplos de modelagem baseada nos dados são as redes neurais artificiais e a modelagem Pesos de Evidência (“*Weights of evidence*”). Essa última, utilizada nesse trabalho, propicia 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, objetivou-se obter um produto que mostrasse numericamente a suscetibilidade à ocorrência de escorregamentos, com aplicação em uma área piloto.

Ao final desse trabalho, espera-se que os resultados obtidos possam ser úteis no sentido de tornar o método aplicável e que essa abordagem venha a se juntar as muitas outras que já existem, como uma alternativa de trabalho. Acredita-se que essa abordagem seja bastante útil, uma vez que existe uma tendência crescente na aplicação de métodos quantitativos e de modelagem dos fenômenos em ambiente automatizado, o que facilita o acesso rápido as informações, bem como a possibilidade de novos testes e aplicações.

1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

O objetivo fundamental desse trabalho é apresentar uma contribuição ao estudo dos escorregamentos no litoral norte do Estado de São Paulo, mais especificamente em parte do município de São Sebastião, utilizando para isso uma abordagem estatística através da aplicação de modelos estocásticos, ou mais especificamente, através da probabilidade condicional ou bayesiana apoiada em Sistema de Informação Geográfica (SIG), para a geração de mapas de suscetibilidade a movimentos de massa.

Em termos específicos esse trabalho tem como objetivos:

1. Testar quais dos condicionantes relacionados para o presente estudo estão associadas de forma mais significativa à ocorrência de movimentos de massa na área.
2. Estabelecer vetores de crescimento da área urbana de São Sebastião, baseado na análise multitemporal de produtos de sensoriamento remoto, para confrontar o mapa de suscetibilidade obtido com as tendências de crescimento, para definição de áreas mais sujeitas ao risco.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, é apresentado o resultado da revisão bibliográfica, realizada com o objetivo de contextualizar o trabalho e apresentar os modelos de representação e processamento de dados que foram utilizados para o desenvolvimento do trabalho. Dessa forma, procurou-se enfatizar as questões teórico-metodológicas e as técnicas utilizadas no âmbito do tema, onde serão abordados os principais conceitos relacionados aos movimentos de massa, enfocando os vários tipos, seus principais condicionantes, os sistemas de classificação mais utilizados, o risco associado a escorregamentos, a cartografia geotécnica digital, bem como será feita uma descrição dos modelos estocásticos de análise espacial, com ênfase no modelo adotado neste trabalho. Considera-se que esses trabalhos podem contribuir diretamente e trazer subsídios para o entendimento do tema proposto no presente trabalho.

2.1 MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA

Os movimentos gravitacionais de massa foram definidos por Hutchinson (1968) *apud* Augusto Filho (1994), como movimentos induzidos pela aceleração gravitacional, com exceção daqueles onde o material é carregado diretamente por um meio de transporte como água, gelo, neve ou ar, nesse caso denominados processos de transporte de massa.

Devido a sua importância como agente externo modelador do relevo, os movimentos gravitacionais de massa têm sido amplamente estudados em todo mundo. Fazem parte da própria dinâmica natural dos terrenos com forte declividade, mas também podem ser induzidos pela ação antrópica como tem acontecido em diversos locais, como é o caso da Serra do Mar onde o homem constitui-se em um importante agente modificador da dinâmica das encostas através das mais variadas formas de uso e ocupação.

2.1.1 Tipos de movimentos gravitacionais de massa

Os movimentos gravitacionais de massa são o resultado de diferentes mecanismos, atuando sobre diferentes tipos de materiais, e podem envolver variações em seus condicionantes tanto naturais quanto antrópicos. Dessa forma, um conhecimento sobre os diferentes tipos é fundamental para a construção de modelos e para a interpretação da relação entre condicionante e probabilidade de ocorrência de eventos dessa natureza.

2.1.1.1 Quedas

Segundo Freire (1965), esse movimento pode ser definido pela ação em queda livre a partir de uma escarpa ou de um talude íngreme, com ausência de uma superfície de movimentação, combinada ou não com outros movimentos como saltos, rotação de blocos e ações de impacto no substrato rochoso.

Segundo Varnes (1978) as quedas são movimentos muito rápidos variando de 0,3 a 30 m/s, podendo ter ou não pequenos movimentos antes da ruptura. Esse autor destaca que a queda acontece quando uma massa é desprendida da área contígua do talude onde está situada, envolvendo normalmente queda de detritos precedendo a ruptura. Pode acontecer tanto em material rochoso quanto em terra e material detrítico.

Guidicini & Nieble (1984) apresentam uma definição com um sentido muito abrangente para o termo “escorregamento” que pode ser confundido com a definição de movimentos gravitacionais de massa de forma genérica. Para esses autores os escorregamentos englobariam todo e qualquer movimento coletivo de materiais terrosos e/ou rochosos, independentemente da diversidade de processos, causas, velocidades, formas e demais características. Para esse trabalho preferiu-se adotar as definições mais simplificadas, subdividindo os diferentes processos de acordo com as descrições apresentadas a seguir.

2.1.1.2 Tombamentos

Varnes (1978) define tombamento como um movimento de rotação de uma ou mais partes do talude em torno de um ponto situado numa posição abaixo, sob a ação da força da gravidade e também de forças externas aplicadas através das unidades adjacentes, ou por fluidos presentes nas discontinuidades da rocha.

Dependendo da geometria do maciço rochoso, da orientação e extensão das descontinuidades esse movimento pode acarretar queda e deslizamento tanto de material rochoso quanto de terra e material detrítico.

2.1.1.3 Escorregamentos

Freire (1965) define escorregamentos como movimentos rápidos de duração relativamente curta de massas de terreno, geralmente com um volume bem definido. É um deslocamento finito ao longo de uma superfície deslizamento definida, preexistente ou de neoformação, subdividido em dois tipos: rotacionais e translacionais. Esta definição de escorregamentos, bem como sua classificação, são também adotadas por Guidicini e Nieble (1976)

Segundo Varnes (1978), a palavra escorregamento especifica movimento relativo de massa, entre a porção estável e a porção móvel do talude, na qual os vetores de movimentação são paralelos à superfície de separação ou ruptura. O movimento consiste na força de cisalhamento ao longo de uma ou várias superfícies visíveis ou inferidas, ou no interior de zonas relativamente estreitas dos maciços.

Alguns autores, entretanto, apresentaram definições bem mais simplificadas, sem levar em consideração os processos, causas ou intensidade. Sassa (1989) define escorregamento como um fenômeno de ruptura de uma encosta seja ela natural ou construída, já Cruden (1991) o define como um movimento de uma massa rochosa, de terra ou detritos encosta abaixo.

Segundo Cerri (1993), o termo escorregamento abrange um conjunto de processos também denominados movimentos gravitacionais de massa, diretamente associados à evolução das encostas, quando utilizados de forma genérica. Quando aplicado de forma restrita o conceito está associado a um tipo particular desses movimentos, que corresponde aos escorregamentos propriamente ditos.

Adotou-se, no presente trabalho, a terminologia de Guidicini e Nieble (1976), tanto no que diz respeito à definição de escorregamentos, quanto aos mecanismos de movimentação, responsáveis pela diferenciação entre os movimentos rotacionais e translacionais.

Os escorregamentos rotacionais, segundo Guidicini e Nieble (1976) e Silva (2001), apresentam uma superfície de ruptura na forma convexa e sem uniformidade circular. Essa geometria é influenciada por falhas, juntas, foliações e outras descontinuidades que estejam presentes no maciço. Os escorregamentos

translacionais são caracterizados por uma movimentação principal ao longo de uma superfície plana, envolvem normalmente material de pequena espessura, variando de 1 a 3 m, larguras medianas de 10 a 20m, e podem atingir grandes extensões, o que vai depender da distância entre o local onde se inicia a ruptura e o fundo do vale, local onde o material proveniente do escorregamento vai se depositar. Esses movimentos caracterizam-se por serem rápidos e de alta energia e acontecem normalmente por ocasião de chuvas intensas, como está amplamente discutido na literatura

Os escorregamentos translacionais constituem o tipo de movimento mais discutido e o mais bem estudado na Serra do Mar paulista, pois, segundo IPT (1998), representam o processo predominante nas suas encostas.

2.1.1.4 Escoamentos

Escoamentos são movimentos contínuos e deformados com diferentes velocidades, em diferentes teores de umidade, que tanto podem ocorrer em rochas quanto em material detrítico. Segundo Freire (1965), tanto podem traduzir-se por rastejo e reptação, no caso do escoamento plástico envolvendo rochas e material detrítico, quanto através de corridas ou escoamento líquido, envolvendo basicamente material detrítico. Ainda segundo esse autor o escoamento plástico envolve rastejo de solo e de detritos de talus, rastejo de rocha, solifluxão, rastejo de detritos de geleiras e geleiras enquanto o escoamento líquido envolve corrida de terra, corrida de areia ou silte, corrida de lama e avalanche de detritos.

Os escoamentos em rocha são, segundo Hutchinson (1988), movimentos lentos profundos e contínuos de difícil medição a não ser em pilares de minas. Esse autor subdivide os escoamentos em função da intensidade do movimento e do tipo de fluxo em “*mudslides*”, “*flow slides*”, “*debris flows*”, “*sturzstroms*” e “*creeps*”.

- ***Mudslides***: São movimentos lentos semelhantes a escorregamentos, incluindo os movimentos lentos e sazonais de acumulação de detritos;
- ***Flow slides***: São rupturas repentinas e extensas de massas de material granular ou detrítico que ocorre quando o material sofre uma sobrecarga que é total ou parcialmente transformada em excesso de poro-pressão, gerando uma perda de resistência, provocando com isso escorregamentos e escoamentos. São constituídos de materiais não

coesivos e mais comumente encontrados em encostas e taludes artificiais;

- **Debris flows:** São fluxos muito rápidos de detritos saturados com alto poder de destruição que ocorrem por ocasião de chuvas intensas ou derretimento de gelo. São considerados uma transição entre movimentos gravitacionais de massa e movimentos de transporte de massa;
- **Sturzstroms:** São fluxos extremamente rápidos de detritos secos, sua deflagração independe da presença de poro-pressões mas do fluxo turbulento dos grãos e das tensões de dispersão geradas pela transferência de energia das colisões.
- **Creep:** são movimentos lentos, mas que após chuvas intensas podem ficar acelerados, que estão associados a variação no teor de umidade, temperatura, congelamento e degelo.

Os escoamentos em materiais detríticos são, segundo Silva (2001), movimentos nos quais a superfície de deslizamento dificilmente pode ser identificada, pois os limites entre o material que se move e o que permanece estático é formado por uma estreita superfície de movimentos diferenciais. Ainda segundo esse autor, esses movimentos podem ser confundidos facilmente com escorregamentos pois existe uma mudança gradativa de um tipo para outro em função do teor de umidade, mobilidade e natureza do movimento.

2.1.1.5 Movimentos de massa complexos

Os movimentos de massa complexos são uma combinação de dois ou mais tipos de processos e segundo Varnes (1978) cada um desses ocorrendo dentro de uma parte do talude em movimento.

Segundo Hutchinson (1988) os resultados mais freqüentes dos movimentos de massa complexos são o arqueamento de vales, movimentos de talude tipo bloco, penhascos de argila abandonados, escorregamentos de lamias ou fluxos na base da encosta, escorregamentos causados por erosão e escorregamentos de múltiplas camadas.

2.1.2 Condicionantes dos movimentos de massa

Condicionantes dos movimentos gravitacionais de massa são aqueles elementos do meio físico ou mesmo do meio biótico que, de alguma forma, contribuem para o desencadeamento do processo. Esses elementos fazem parte da própria dinâmica dos processos naturais, contudo a influência que exercem sobre esses processos pode ser potencializada pela ação antrópica.

Alguns autores utilizam termos como causa e agente quando se referem ao modo de atuação de um determinado condicionante na deflagração dos movimentos de massa. Guidicini & Nieble (1976) utilizam esses termos subdividindo causas em internas, externas e intermediárias e os agentes em predisponentes e efetivos preparatórios e efetivos imediatos. (Tabela 2.1).

Os agentes predisponentes são os fatores naturais característicos dos terrenos como condições geológicas, geomorfológicas entre outras, onde não se incluiriam as ações antrópicas. Os agentes efetivos, por sua vez, são aquelas características do terreno responsáveis diretos pela pelo desencadeamento dos movimentos de massa, incluindo-se aí as ações antrópicas, além das causas naturais. Como exemplo, podem ser citadas as chuvas intensas, desmatamentos, terremotos, variações do nível da água subterrânea, etc.

Quanto às causas, as internas referem-se àquelas que podem levar ao desencadeamento do processo sem qualquer alteração na geometria do talude e são o resultado da diminuição da resistência do material. As causas externas, ao contrário, são aquelas que provocam aumento das tensões de cisalhamento sem que haja variação na resistência do material e estão associadas normalmente a sobrecargas oriundas de aterros, sismos, aumento da declividade por processos naturais ou induzidos. As causas intermediárias são aquelas resultantes dos efeitos provocados principalmente pelas oscilações do nível da água.

Tabela 2.1 Principais agentes e causa dos escorregamentos. (Adaptado de Guidicini & Nieble, 1976)

CAUSAS			AGENTES		
Internas	Externas	Intermediárias	Predisponentes	Efetivos	
				Preparatórios	Imediatos
Efeito das oscilações térmicas; redução dos parâmetros de resistência ao cisalhamento por intemperismo.	Mudanças na geometria da encosta; efeitos de vibrações; mudanças naturais na inclinação das camadas.	Elevação do nível piezométrico em massas homogêneas; elevação da coluna d'água em descontinuidades; rebaixamento rápido do lençol freático; erosão subterrânea retrogressiva (<i>pipping</i>); diminuição do efeito da coesão aparente.	Complexo geológico, geomorfológico e climatológico; gravidade, calor solar, vegetação.	Pluviosidade, erosão pela água e vento, congelamento e degelo, variação de temperatura, dissolução química, ação de fontes e mananciais, oscilação do nível de lagos e marés e do lençol freático, ação de animais e humana, inclusive deflorestamento	Chuvas intensas, fusão do gelo e neves, erosão, terremotos, ondas, vento, ação do homem.

Segundo Varnes (1978), os movimentos de massa apresentam, em geral, uma série contínua de causas e efeitos e uma ação simples pode desencadear a movimentação, mas nenhum fator ou causa pode ser considerada como única na deflagração de um processo, muito embora ela seja necessária. A Tabela 2.2 mostra exemplos de ações e fatores que influenciam os movimentos gravitacionais de massa.

Tabela 2.2 Ação dos fatores que influenciam nos movimentos gravitacionais de massa. (Varnes, 1978).

AÇÃO	FATORES	FENÔMENOS NATURAIS / ANTRÓPICOS
AUMENTO DAS TENSÕES CISALHANTES	Remoção de massa (lateral da base)	<ul style="list-style-type: none"> - Erosões provocadas por rios, geleiras e ondas marítimas; - Movimentos de massa anteriores, queda de blocos, escorregamentos; - Atividades mineradoras, fluxo de água subterrânea com dissolução e remoção de materiais.
	Sobrecarga	<ul style="list-style-type: none"> - Agentes naturais: chuva, gelo, tálus, percolação de água; - Agentes antrópicos: construção de aterros, edificações, barragens.
	Solicitações dinâmicas	Terremotos, vibrações produzidas por máquinas, tráfego, explosões.
	Pressões laterais	Água em fraturas, expansões de argilo-minerais.
REDUÇÃO DA RESISTÊNCIA	Características inerentes ao material e estado inicial	<ul style="list-style-type: none"> - Composição, textura, presença e orientação das discontinuidades, orientação do talude, geometria; - Mudanças nas características geomecânicas do material, tensões iniciais.
	Mudanças ou fatores variáveis	Ação do intemperismo, elevação do nível d'água, mudanças na estrutura, como amalgamento de argilas.
	Outras causas	<ul style="list-style-type: none"> - Enfraquecimento devido o rastejo progressivo; - Ação das raízes e buracos feitos por animais.

Com relação aos condicionantes principais dos movimentos gravitacionais de massa, muito embora varie de autor para autor, de uma maneira geral são considerados aspectos relacionados com a geologia, geomorfologia, aspectos climáticos e pluviométricos, vegetação e ação antrópica, sendo esta relacionada às formas de uso e ocupação do solo.

De Ploey & Cruz (1979) consideraram condicionantes responsáveis pela instabilidade das escarpas da Serra do Mar, a declividade acentuada, a grande

amplitude do relevo, a pluviosidade elevada, a drenagem superficial e subterrânea, a vegetação natural alterada pela ação antrópica e a complexidade geológica.

2.1.2.1 Geologia

É de senso comum que aspectos relacionados à geologia como composição físico-química das diferentes litologias, suas propriedades mecânicas, estruturas geológicas e grau de intemperismo são muito importantes na deflagração dos movimentos gravitacionais de massa. Segundo Guidicini & Nieble (1984), o processo de alteração no solo é diferente daquele que ocorre nas rochas. No solo, a alteração pode resultar no adensamento ou cimentação secundária aumentando assim sua resistência com relação aos movimentos gravitacionais. Na rocha ao contrário, o processo de intemperismo, que provoca alteração nas propriedades do material rochoso, produz redução nos parâmetros de resistência do maciço e, conseqüentemente, na estabilidade do mesmo.

Para Bogossian (1992), as características das discontinuidades e as propriedades da rocha matriz que deram origem ao solo, são fundamentais no comportamento das encostas. Entretanto, alguns autores atribuem uma importância secundária a esse fator, e defendem que o grau de intemperismo em perfis residuais tenha uma importância bem maior do que as características anisotrópicas da rocha de origem.

Segundo Machado Filho (2000), os problemas de instabilidade das encostas estão ligados a uma multiplicidade de fatores naturais, que se iniciam na própria formação geológica do maciço e continuam através de sua evolução estrutural. Este autor salienta que as estruturas rúpteis, representadas por lineamentos estruturais e planos de discontinuidades são claramente condicionantes da estabilidade geral das encostas, na Serra de Cubatão, manifestando-se localmente nos horizontes estruturados saprolíticos e no maciço rochoso fraturado.

2.1.2.2 Geomorfologia

Aspectos ligados a geomorfologia também desempenham um papel fundamental na estabilidade das encostas como, principalmente, a tipologia das encostas e a declividade. Segundo Wolle (1980), o conhecimento da evolução geomorfológica de uma ou de um conjunto de encostas pertencentes a uma

determinada área, é de fundamental importância para a compreensão dos processos de instabilização ocorridos, ou que poderão vir a ocorrer.

A declividade da encosta é, sem dúvida, uma das principais causas predisponentes na deflagração de escorregamentos. Cruz (1975) constatou que os maiores escorregamentos ocorridos no verão de 1967 em Caraguatatuba, litoral norte de São Paulo ocorreram acima do limite de 40% de declividade, que corresponde a 22^o e que a 15^o era verificada uma grande frequência de cicatrizes de erosão ligadas aos movimentos de massa.

Sidle *et al.* (1985) argumentam que embora seja difícil estabelecer limites para o ângulo de inclinação das encostas ditas instáveis, a maioria dos taludes com ângulos maiores que 25^o podem apresentar movimentação mais rápida do que aqueles onde os valores são inferiores a esses valores. Quanto à utilização desse fator como evidência de escorregamentos é impossível avaliar os processos naturais e induzidos sem considerar a extrema importância da declividade, bem como desenvolver projetos de planejamento que subsidiem políticas de uso e ocupação do espaço físico, seja ele urbano ou rural.

Além do fator declividade, a forma da vertente também influencia o desenvolvimento de instabilidades. Segundo IPT (1988), a forma da vertente exerce uma influência na estabilidade da seguinte maneira: As encostas retilíneas tendem a apresentar maiores declividades em geral, que as convexas, assim são mais suscetíveis a escorregamentos; Nas encostas da Serra do mar existe uma predominância das encostas retilíneas nas cotas mais elevadas, onde, geralmente concentram-se os maiores índices pluviométricos, que potencializam a instabilidade das mesmas. Encostas convexas apresentam, em média, maiores espessuras de solos, que pode influenciar no sentido de favorecer a instabilidade, potencializando uma ruptura mais profunda.

2.1.2.3 Aspectos climáticos/pluviosidade

A pluviosidade, segundo IPT (1988), não se constitui propriamente em um condicionante do escorregamento, mas sim no principal agente deflagrador imediato do processo, de forma que utiliza esse parâmetro de forma indireta na obtenção das classes de suscetibilidade. De acordo com esse trabalho, a interferência da chuva acontece de três maneiras.

1. Os componentes coesão e ângulo de atrito da resistência ao cisalhamento diminuem substancialmente (principalmente coesão), quando o material está saturado em água. Com precipitações intensas e a saturação desses poros pequenos, ocorre diminuição ou desaparecimento da pressão de sucção ou coesão aparente, diminuindo a componente coesão e acarretando um decréscimo no fator de segurança, podendo provocar instabilização da encosta.
2. Com o umedecimento do solo, mesmo antes de se atingir a saturação, existe um aumento do peso específico deste, que interfere na relação fator de segurança, diminuindo-a, sendo portanto favorável ao desencadeamento dos escorregamentos.
3. Não há formação de Níveis de água rasos o suficiente para interferirem no processo de deflagração dos escorregamentos translacionais. Porém, localmente pode ocorrer na encosta um meio mais permeável sob um meio menos permeável, criando condições para formação de um NA, mesmo que de curta duração. Neste caso, poderão se estabelecer linhas de fluxo paralelas a encosta, com o mesmo sentido da tensão cisalhante, além da tensão normal ser diminuída pela atuação da pressão neutra. Ambos os fatores favorecem a ocorrência dos escorregamentos.

Segundo Augusto Filho (2001), as chuvas atuam como principal agente não antrópico causador dos escorregamentos no Brasil, o que pode ser atestado pela deflagração dos eventos que normalmente acontecem no período mais chuvosos. Alguns autores tentaram estabelecer a correlação entre chuvas e escorregamentos matematicamente. O primeiro trabalho nesse sentido no Brasil é o de Guidicini & Iwasa (1976), que tenta estabelecer a correlação entre pluviosidade em meio tropical úmido e os escorregamentos.

2.1.2.4 Vegetação

A cobertura vegetal desempenha um importante papel na estabilidade das encostas. Segundo IPT (1988) a influência da vegetação se dá:

1. Através da redistribuição da água proveniente das chuvas: as copas das árvores impedem em parte, o impacto direto da chuva no solo e retardam e diminuem a quantidade efetiva de água que penetra no solo, restringindo

assim, a perda da coesão e ângulo de atrito, aumento do peso específico do solo por umedecimento e possibilidade de formação do NA.

2. Pelo acréscimo de resistência do solo devido às raízes; as raízes da vegetação de porte arbóreo podem aumentar a resistência ao cisalhamento do solo de duas maneiras: Pelo reforço mecânico do solo, onde existe uma transferência parcial da tensão do cisalhamento atuante no solo para as raízes; e por escoramento, quando as raízes são profundas e pivotantes, ancorando os caules das árvores, que passam a atuar como pilastras de sustentação dos horizontes superficiais.

Por outro lado, Gray & Leiser (1982) destacam que são reconhecidos os efeitos desfavoráveis à estabilidade provocados pela cobertura vegetal, que seriam: o efeito alavanca, produzido pelos troncos das árvores, quando suas copas são atingidas por ventos; o efeito cunha, causado pelas raízes ao penetrar em fendas, fissuras e canais de solo ou rocha. Outro efeito seria a sobrecarga vertical sobre a encosta causada pelo peso das árvores, atuante principalmente quando existem florestas densas e processos de instabilização com superfície de ruptura rasa (WOLLE, 1980). Essa sobrecarga pode ter uma ação benéfica ou não na estabilidade, em função da inclinação da encosta e das características do solo.

Segundo Augusto Filho (1994), o sistema radicular das árvores atua sobre os aspectos de estruturação do solo, aumentando sua resistência ao cisalhamento, retendo as partículas do solo no terreno, diminuindo com isso a suscetibilidade a erosão.

Alguns modelos de avaliação e quantificação da suscetibilidade a escorregamentos rasos de solo como é o caso do *SHALSTAB* (Dietrich & Montgomery 1998), utilizam a força de resistência da raiz como um parâmetro da equação de estabilidade do solo como um termo de coesão adicional. Contudo consideram esse termo como uma constante, muito embora estudos de campo mostrem que ela é perfeitamente quantificável. (Endo & Tsuruta, 1969; Burroughs & Thomas, 1977; Gray & Megahan, 1981).

A importância da cobertura vegetal na manutenção da estabilidade das encostas é indiscutível. Segundo Santos (2002), ela é único fator externo inibidor do movimento superficial dos terrenos, cumprindo esse papel através dos seguintes atributos:

- Impedindo a ação direta das gotas da chuva no solo através das copas e da serapilheira;
- Impedindo a ação erosiva do *runn-off* através de raízes superficiais e da serapilheira;
- Provocando a retenção por molhamento de parte da água da chuva que chegaria ao solo;
- Retirando por absorção e devolvendo por evapotranspiração parte da água infiltrada no solo;
- Agregando, tornando coeso e retendo os solos superficiais através de uma formidável malha superficial e subsuperficial de raízes.

2.1.2.5 Ação antrópica

Muito embora os movimentos gravitacionais de massa sejam parte da dinâmica natural de áreas com encostas íngremes, a ação do homem, através de suas mais variadas formas de uso e ocupação do solo, interfere na evolução natural desses processos, ora induzindo, ora diminuindo os seus efeitos.

Dentre as principais alterações produzidas pela ocupação das encostas, com objetivos e conseqüências diversas, Cerri (1993) destaca a execução de cortes e aterros com objetivo de construção de moradias, instalação de moradias muito próximas à base ou ao topo dos taludes naturais ou de corte, com o objetivo de maior aproveitamento dos terrenos, retirada da cobertura vegetal, cultivo de espécies que favorecem a instabilidade das encostas para produção de alimentos, lançamento, em superfície, das águas servidas, concentração de águas pluviais e construção de fossas possibilitando uma constante infiltração de água nos maciços e lançamento de entulhos e lixo nas encostas possibilitando o acúmulo de materiais altamente instáveis.

Silva (2001) destaca ainda modificações nos padrões de drenagens pelo despejo do lixo, pela construção de moradias em calhas naturais, os cortes inadequados para abertura de ruas. Esse autor cita ainda as atividades de mineração e obras de engenharia que podem acarretar vários problemas. São elas grandes escavações, cortes e disposição de rejeitos e estéreis gerados na forma de aterros, bota fora e barragens provocando conseqüências como aumento da declividade, produção de vibrações, alteração da drenagem natural, remoção da

cobertura vegetal, alteração do escoamento superficial, fraturamento dos maciços, etc.

2.1.3 Principais classificações dos movimentos de massa

Devido a sua importância do ponto de vista político, econômico, social e prático, além de constituir um importante agente externo de modelamento da paisagem, os escorregamentos têm merecido, ao longo do tempo, a atenção de muitos pesquisadores e, por conseguinte, a literatura apresenta um grande número de trabalhos científicos que discutem e propõem uma série de sistemas classificatórios, que retratam as diferentes possibilidades de enfoques, dependendo do interesse e da especialização de quem os estuda.

Essa multiplicidade de enfoques, na interpretação de Zaruba & Menci (1969) *apud* Guidicini & Nieble (1984), justifica-se pelo fato dos escorregamentos envolverem muitos processos e fatores intervenientes, o que possibilitaria uma quantidade ilimitada de classificações.

A literatura internacional registra, desde há muito tempo, proposições de sistemas classificatórios que contemplam essas diversas abordagens, sendo que a maioria dessas classificações apresenta aplicabilidade regional. Muitos autores fazem referência a vários trabalhos que desde o início do século XX procuram estabelecer classificações para os movimentos de massa, entre eles Baltzer (1875), Heim (1882), Penck (1894), Molitor (1894), Brawn (1908), Howe (1909), Almagia (1910), Stini (1910), Terzaghi (1925), Pollack (1925), Ladd (1935), Hennes (1936), Sharpe (1938), Varnes (1958), Freire (1965), Ter-Stepanian (1966), Skempton E Hutchinson (1969).

Há diferentes motivações para os tipos de classificações existentes, algumas se baseiam simplesmente na presença ou ausência de uma superfície de ruptura preexistente, outras, no entanto, baseiam-se em um mecanismo de ruptura progressiva. Outro critério de classificação procura correlacionar o tipo e a velocidade da movimentação com a natureza do material da massa em movimento, procurando estabelecer associações entre esse material aos ambientes geomorfológico e climático, como acontece com a classificação de Sharpe (1938). Muito embora seja bastante simplificada essa classificação é considerada a primeira

que buscou obter uma maior abrangência entre as diferentes formas de abordar os escorregamentos (Tabela 2.3).

Para as classificações em língua portuguesa, as mais antigas que encontram maior destaque na literatura são as de Freire (1965) e Vargas (1966), ambas com conotações regionais voltadas a movimentos gravitacionais de massa em ambientes tropical e subtropical úmidos, sendo assim mais adaptadas às condições climáticas brasileiras.

Tabela 2.3 – Sistematização dos movimentos de massa, de acordo com Sharpe (1938)

MOVIMENTO			GELO		SOLO OU ROCHA	ÁGUA					
	Tipo	Velocidade	Gelo predom	Solo ou rocha com gelo	Solo ou rocha, seco ou com reduzida quantidade de gelo ou água	Solo ou rocha com água	Água predominante				
Com frente livre de movimentação	Escoamento	Geralmente imperceptível	Transporte glacial	Rocha. detrito p/ geleira	Rastejo de rocha		Corrida de solo	Transporte fluvial			
		Lento a rápido perceptível rápido		Solifluxão	Rastejo de tálus	Rastejo de solo			Solifluxão		
		Escorregamento		Lento a rápido perceptível rápido	Avalancha de detritos	Escorregamento rotacional			Escorregamento de detritos	Avalancha de detritos	Corrida de lama
	Rápido ou lento			Escorregamento de rocha			Queda de rocha				Subsidência
	Sem frente livre	Escoamento ou escorregamento		Rápido ou lento							

A Classificação considerada pioneira no Brasil, mostra um quadro sintético sobre os movimentos de massa onde Freire (1965) procura apresentar uma visão unificada das noções essenciais contidas nos trabalhos de diversos autores, como Sharpe (1938). Neste trabalho, os movimentos de solo e de rocha são classificados em três tipos fundamentais:

1. **Escoamento:** corresponde a uma deformação, ou movimento contínuo, com ou sem uma superfície de movimentação definida. Incluem corrida (escoamento fluido viscoso – corrida de terra, corrida de areia ou silte, corrida de lama, avalanche de detritos) e rastejo ou reptação (escoamento plástico);
2. **Escorregamento:** deslocamento finito ao longo de uma superfície de deslizamento definida, preexistente ou de neoformação. Podem ser rotacionais e translacionais;
3. **Subsidência:** Deformação contínua, de direção essencialmente vertical. Podem ser divididas em subsidências propriamente ditas, recalques e desabamentos.

Guidicini & Nieble (1984) adotam a classificação proposta por Freire (1965), e propõem uma modificação com relação à distribuição das classes de escorregamentos translacionais e com um enfoque diferente entre agentes e causas dos movimentos de massa. (Tabela 2.4)

Vargas & Pitcher (1957) propõem uma classificação subdividindo os escorregamentos ocorridos na faixa litorânea da região sudeste do Brasil, em três classes;

1. Rastejo de camadas superficiais de solo residual;
2. Movimento de detritos acumulados a partir de escorregamentos pretéritos;
3. Escorregamentos repentinos de solo residual.

A essa classificação, Vargas (1966) acrescentou os escorregamentos de blocos de rochas e matacões. Vargas (1999) apresenta a classificação atualizada dos movimentos de massa, mostrada na Tabela 2.5. Nessa classificação, o autor sugere que para as avalanches com fluxos de lama e de blocos de rochas por ocasião de grandes chuvas ou tempestades, não existiria nenhuma forma de prevenção.

Tabela 2.4 - Classificação dos movimentos gravitacionais de massa, segundo Freire (1965) modificada por Guidicini & Nieble (1984)

TIPO FUNDAMENTAL	SUB-TIPO	CLASSES PRINCIPAIS
ESCOAMENTOS	RASTEJO, REPTAÇÃO (Escoamento plástico)	<ul style="list-style-type: none"> • Rastejo de solo • Rastejo de detritos de tálus • Rastejo de rocha • Solifluxão • Rastejo de detritos de geleiras • Geleiras
	CORRIDAS (Escoamento líquido)	<ul style="list-style-type: none"> • Corrida de terra • Corrida de areia ou silte • Corrida de lama • Avalanche de detritos
ESCORREGAMENTOS	ESCORREGAMENTOS ROTACIONAIS	<ul style="list-style-type: none"> • Escorregamento de taludes • Escorregamento de base do talude • Rotura rotacional de solo de fundação
	ESCORREGAMENTOS TRANSLACIONAIS	<ul style="list-style-type: none"> • Escorregamento translacional de rocha • Escorregamento translacional de solo • Escorregamento translacional de solo e rocha • Escorregamento translacional retrogressivo • Queda de rocha • Queda de detritos
SUBSIDÊNCIAS	SUBSIDÊNCIAS	<ul style="list-style-type: none"> • Por carreamento de grãos • Por dissolução de camadas inferiores e cavernas • Por deformações de estratos inferiores • Por rotura de estratos inferiores • Por retirada do suporte lateral
	RECALQUES	<ul style="list-style-type: none"> • Por consolidação • Por compactação
	DESABAMENTOS	<ul style="list-style-type: none"> • Por rotura de camada • Por subescavação • Por retirada do suporte lateral
Formas de transição ou termos de passagem		
Movimentos de massa complexos		

Tabela 2.5 Classificação dos movimentos de massa proposta por Vargas (1999)

	CLASSE	OCORRÊNCIA	OCASIÃO	PREVENÇÃO
MOVIMENTOS PLÁSTICOS OU VISCOSOS	RASTEJO DE CAMADAS SUPERFICIAIS (creeping)	Movimentos lentos de rastejo mobilizando parte de resistência ao cisalhamento	Movimento constante acelerado durante a época chuvosa	Impermeabilização da superfície Drenagem superficial
	DESLIZAMENTO DE TÁLUS	Movimentos contínuos de depósitos de escorregamentos anteriores	Corte no pé do "tálus" durante a época chuvosa	O mesmo mais subdrenagem com drenos horizontais ou galerias
DESLIZAMENTOS AO LONGO DE SUPERFÍCIES DE RUPTURA	DESLIZAMENTOS PLANARES	Deslizamento de manto relativamente delgado sobre a superfície da rocha	Ruptura repentina durante ou depois de chuvas maiores que 100mm/dia. Ao fim dos períodos de chuva	O mesmo mais retaludamento. Bermas de pé de talude Muros de arrimo por gravidade ou ancoragem
	DESLIZAMENTOS ROTATÓRIOS	Deslizamento de solos residuais ou maciços saprolíticos, eventualmente com blocos de rocha		
DESLIZAMENTOS ESTRUTURAIS DE MACIÇOS ROCHOSOS	DESLIZAMENTOS DE CUNHAS OU PLACAS	Deslizamento ao longo de descontinuidades planas	Ruptura repentina durante ou depois de chuvas maiores que 100mm/dia. Não necessariamente ao fim dos períodos de chuva	Ancoragem de rocha Estruturas ancoradas
	DESLIZAMENTOS DE MACIÇOS MUITO FRATURADOS	Deslizamentos dos maciços rochosos muito fraturados em blocos, às vezes envolvidos em lama		
	QUEDAS DE ROCHA	Desmoronamento de blocos de rocha instáveis		
AVALANCHES	FLUXOS DE LAMA	Erosão ou liquefação de camadas superficiais	Durante tempestades maiores que 100mm/dia em épocas chuvosas de anos chuvosos	<u>Não existe remédio</u>
	FLUXOS DE BLOCO DE ROCHA	Demolição hidráulica de maciços rochosos muito fraturados e decompostos		

A classificação apresentada por Nencock *et. al.* (1972) *apud* Macedo (2001) baseia-se na presença de corpos rochosos, onde aparecem quatro classes: quedas, fluxos, escorregamentos e escoamentos. Hutchinson (1988) propõe uma

classificação onde aparecem as classes recuo, rastejo, rompimento de taludes de montanhas, escorregamentos, movimentos de detritos na forma de fluxos, tombamentos, quedas e movimentos complexos de taludes. A classificação de Varnes (1978), modificada por Cruden & Varnes (1996), ao lado da classificação de Hutchinson (1988), são as mais utilizadas nos países de língua inglesa. (Tabela 2.6)

Tabela 2.6 - Classificação simplificada dos movimentos de encostas, segundo Varnes (1978), modificada por Cruden & Varnes (1996),

TIPO DE MOVIMENTO			TIPO DE MATERIAL		
			ROCHA	SOLOS (sob o ponto de vista da engenharia)	
				Textura grossa	Textura fina
QUEDAS			Queda de rocha	Queda de detritos	Queda de terra
TOMBAMENTOS			Tombamento de rocha	Tombamento de detritos	Tombamento de terra
ESCORREGAMENTOS	ROTACIONAL	Poucas unidades	Abatimento de rocha	Abatimento de detritos	Abatimento de terra
			Blocos rochosos	Blocos de detritos	Blocos de terra
	TRANSLACIONAL	Muitas unidades	Rocha	Detritos	Terra
			Rocha	Detritos	Terra
EXPANSÕES LATERAIS			Rocha	Detritos	Terra
FLUXOS			Rocha (rastejo profundo)	Detritos (rastejo de solo)	Terra
COMPLEXOS (Combinação de dois ou mais dos principais tipos de movimento)					

Wolle (1998), a partir de vários trabalhos desenvolvidos na Serra do Mar, propõe uma classificação em que os escorregamentos translacionais planares do solo são subdivididos em dois tipos: aqueles provocados pela elevação de um nível de água pré-existente e os provocados pela infiltração sem um nível de água pré-existente. (Tabela 2.7). Percebe-se claramente que existe uma preocupação com os escorregamentos translacionais do solo porque, segundo Augusto Filho (1994),

esses podem ser considerados um dos principais processos de movimentos de massa atuantes no Brasil.

Tabela 2.7 - Classificação dos movimentos de massa proposta por Wolle (1988)

CLASSES	SUBCLASSES	
ESCORREGAMENTOS EM SOLO	Escorregamentos translacionais (planares)	Provocados pela elevação de um nível d'água preexistente
		Provocados pela infiltração sem um nível d'água preexistente
	Escorregamentos rotacionais	
	Escorregamentos provocados por desconfinamento	
ESCORREGAMENTOS EM ROCHA E SAPROLITO	Quedas de blocos	
	Rolamentos de matacões	
	Deslizamento de blocos e Lascas	
	Escorregamentos estruturados	Em rocha fraturada
		Em saprolito
ESCOAMENTOS LENTOS E MUITO LENTOS	Movimentos de massa de tálus (colúvio)	
	Rastejo em solo superficial nas encostas	
	Rastejo profundo em solo	

IPT (1991) e Augusto Filho (1992) propuseram uma classificação bastante simplificada, em que os movimentos de massa são subdivididos em rastejos (*creep*), escorregamentos (*slides*), quedas (*falls*) e corridas (*flows*). (Tabela 2.8).

Fernandes & Amaral (1996), ao comparar as propostas de classificação apresentadas por Freire (1965) e Guidicini & Nieble (1984), que na verdade é uma modificação da proposta de Freire, com a redistribuição dos escorregamentos e inclusão das formas de transição e movimentos complexos, e a proposta do IPT (1991), adotaram esta última, com ressalvas, por considerarem que as classificações têm limitações práticas por serem simplistas, já que os deslizamentos na natureza assumem formas bem mais complexas, caracterizadas pela transição dos limites rígidos entre as classes ou mesmo pela ocorrência de várias classes em um mesmo movimento.

Tabela 2.8 Classificação dos movimentos de massa. Segundo IPT (1991) e Augusto Filho (1992)

PROCESSOS	CARACTERÍSTICA DO MOVIMENTO/MATERIAL/GEOMETRIA
RASTEJO (<i>CREEP</i>)	<ul style="list-style-type: none"> • Vários planos de deslocamento (internos); • Velocidades muito baixas a baixas (cms/ano) e decrescentes com a profundidade; • Movimentos constantes, sazonais ou intermitentes; • Solo, depósitos, rocha alterada/fraturada; • Geometria indefinida
ESCORREGAMENTOS (<i>SLIDES</i>)	<ul style="list-style-type: none"> • Poucos planos de deslocamento (externo); • Velocidades médias (m/h) a altas (m/s); • Pequenos a grandes volumes de material; • Geometria e materiais variáveis: Planares: Solos pouco espessos, solos e rochas com um plano de fraqueza; Circulares: Solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas; Em cunha: Solos e rochas com dois planos de fraqueza.
QUEDAS (<i>FALLS</i>)	<ul style="list-style-type: none"> • Sem planos de deslocamento; • Movimento tipo queda livre ou em plano inclinado; • Velocidades muito altas (vários m/s); • Material rochoso; • Pequenos a médios volumes; • Geometria variável: Lascas, placas, blocos etc.. • Rolamento de matacão; • Tombamento
CORRIDAS (<i>FLAWS</i>)	<ul style="list-style-type: none"> • Muitas superfícies de deslocamento • Movimento semelhante ao de um líquido viscoso; • Desenvolvimento ao longo das drenagens; • Velocidades médias a altas; • Mobilização de solo, rocha, detritos e água; • Grandes volumes de material; • Extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas.

2.1.4 Risco associado a escorregamentos

Nas últimas décadas, dentro da geologia de engenharia, a área de estudo sobre risco associado a movimentos gravitacionais de massa, tem experimentado um grande avanço técnico científico, no que diz respeito aos seus conceitos básicos, sejam esses fenômenos naturais ou induzidos. Em função disso, vários autores têm tecido considerações no que concerne à conceituação, de modo que existe um número muito grande de termos empregados por esses autores sendo que nem sempre existe consenso ou padronização com relação ao emprego desses termos. De qualquer forma, a bibliografia é bastante variada.

Discussões acerca dessas conceituações foram feitas por Burton & Kates (1964), Ayala (1986), Ayala & Peña (1989), Augusto Filho *et al* (1990), Cerri (1993), Zuquette (1993), IUGS (1997), Castro (1998). A seguir serão apresentadas alguns dos conceitos mais utilizados.

White (1974) define o **perigo natural** como condição potencial para a ocorrência de eventos extremos que excedem a capacidade normal do sistema humano para refletir, absorver ou amortecer as conseqüências por eles gerados. Os processos são nevoeiros, friagem, granizo, escorregamentos, trovões, neve, tornados, ciclones tropicais, vulcões e ventos. Para esse autor não existe situação de perigo natural separada do sistema humano e da sua capacidade de adaptação.

Para Arnould (1976), existem vários grupos de processos geradores de acidentes geodinâmicos, ou de origem geológica natural além dos induzidos pelo homem. São eles, terremotos e tsunamis, atividades vulcânicas, tectonismo e falhas ativas, enchentes e inundações, erosão e sedimentação, escorregamentos, quedas de rochas, colapsos, subsidências, avalanchas, expansão, acomodação e liquefação do solo. Para esse autor, os fenômenos climáticos, tais como furacões, tufões, nevascas e relâmpagos são importantes agentes deflagradores de acidentes naturais, além de estarem relacionados com a dinâmica de vários dos processos geológicos listados anteriormente.

Cerri (1992) define **acidente** como um fato já ocorrido, com o registro de conseqüências sociais e/ou econômicas relacionadas diretamente ao fato, **evento** como fato já ocorrido, onde às conseqüências mencionadas anteriormente não foram relacionadas diretamente ao fato e **risco** como a possibilidade de ocorrência de um acidente. Esse autor também faz uma distinção entre os termos suscetibilidade e risco. Enquanto o primeiro seria a probabilidade de ocorrência de

um evento, o segundo seria o resultado da combinação entre a probabilidade de ocorrência de um evento (suscetibilidade) e as conseqüências sociais e econômicas potenciais.

Zuquette (1993) apresenta a seguinte conceituação;

Evento: Fenômeno com características, dimensões e localização geográfica registrada no tempo;

Evento Perigoso: Representa um perigo que se associa a um fenômeno de origem natural ou provocado pelo homem, que se manifesta em um lugar específico, em tempo determinado, produzindo efeitos adversos nas pessoas, nos bens e/ou no meio ambiente.

Processo Perigoso: Conjunto de fenômenos que antecedem o evento perigoso puro (hazard) e que é tomado erroneamente como sinônimo de evento perigoso (hazard) que conceitualmente são diferentes;

Vulnerabilidade: Característica intrínseca de um sujeito, sistema ou elemento que estão expostos a um evento perigoso (hazard), correspondendo a predisposição destes em serem afetados ou suscetíveis a perdas. É expressa em uma escala que varia de 0 (sem perdas) a 1 (perdas totais);

Risco: É a probabilidade de que ocorram perdas (econômicas, sociais e ambientais), além de um valor limite considerado normal ou aceitável para um lugar específico durante um período de tempo determinado. É considerado o resultado da relação entre um evento perigoso (hazard) e a vulnerabilidade dos elementos (seres humanos, residências entre outros) expostos.

Ampla discussão sobre essa conceituação pode ser encontrada em Cerri (1993), Wickman & Timberlake (1985) *apud* Cerri (1993), Burton & Kates (1964), Augusto Filho (1990) entre outros.

Vários autores como Varnes *et al*, (1985), Cendrero *et al.*,(1987), IPT (1993) e Augusto Filho (1994), utilizam o conceito de risco atual e risco potencial. Para eles áreas de risco atual correspondem a situações com risco instalado representando um certo corte no tempo, enquanto risco potencial caracteriza locais com suscetibilidade à ocorrência de eventos, em áreas pouco adensadas. Segundo Cerri (1993), a diferença entre esses dois tipos de risco tem por objetivo eliminar as situações de risco já instaladas e evitar a instalação de novas áreas de risco.

Sobrowick (1996) classifica os perigos naturais em cíclicos, eventos únicos e eventos raros. Eventos cíclicos seriam aqueles aonde dados estatísticos podem ser obtidos pela observação direta durante um período de tempo. Nesse caso, a

probabilidade do perigo é derivada da freqüência esperada deste processo em determinada área. Exemplos desses eventos são as tempestades, enchentes, terremotos, etc... Eventos únicos são aqueles onde a probabilidade do perigo é estimada de dados da freqüência da ocorrência em áreas com características geológicas e geomorfológicas entre outras, semelhantes. Neste caso, existe uma tendência regional, e o evento é condicionado a feições ou condições pré-existentes como movimentos do terreno, trincas, condições desfavoráveis do lençol freático, etc. Exemplos são os grandes escorregamentos. Já eventos raros são definidos como aqueles onde o evento ocorre tão raramente que é difícil obter amostras ou exemplos. Nesse as evidências existem mas a obtenção de estimativas confiáveis das reais possibilidades de deflagração do evento é muito difícil.

Carvalho (1996) define risco geotécnico como uma conseqüência esperada de eventos aleatórios associados a processos de instabilização de maciços naturais, maciços artificiais ou obras geotécnicas. Os processos de instabilização, segundo esse autor, englobam os de natureza geológica naturais e os induzidos pela atividade humana.

Reconhecendo a diversidade de definições relacionadas a riscos ambientais geológicos, o IUGS Working Group Committee in Risk Assessment (1997) apresentou uma proposta de conceituação objetivando unificar os conceitos, proposta essa que foi adotada pelo USGS (International Union of Geological Sciences). A definição dos principais termos, com ênfase em riscos associados a escorregamentos, foi apresentada por Augusto Filho (2001), como descrito a seguir.

Risco (*Risk*): Medida de probabilidade e severidade de um efeito adverso para a saúde, propriedade ou ambiente. O risco é geralmente estimado pelo produto entre a probabilidade e as conseqüências. Entretanto, a interpretação mais genérica de risco envolve a comparação da probabilidade e conseqüências, não utilizando o produto matemático entre esses dois termos, para expressar os níveis de risco;

Processo Perigoso (*Danger*): Fenômeno natural geometricamente e mecanicamente caracterizado.

Perigo (*Hazard*): Uma situação para causar uma conseqüência desagradável.

Elementos sob Risco (*Elements at Risk*): Significando a população, as edificações e as obras de engenharia, as atividades econômicas, os serviços públicos e a infraestrutura na área potencialmente que pode ser afetada pelos escorregamentos;

Probabilidade – P (*Probability*): A probabilidade de um resultado específico, medido pela razão entre o número de resultados e todos os resultados possíveis. A

probabilidade é expressa como um número entre 0 e 1, com 0 indicando resultado impossível e 1 indicando que um resultado é certo;

Considerando-se esses conceitos, é nesse ponto que esse trabalho pretende contribuir, quando buscou quantificar a probabilidade de ocorrer um evento, partindo de eventos ocorridos e mapeados, fazendo isso não apenas através de um modelo probabilístico que incluiu os eventos ocorridos no cálculo da probabilidade.

Vulnerabilidade – V (*Vulnerability*): O grau de perda para um dado elemento ou grupo de elementos dentro de uma área afetada por escorregamentos. Ela é expressa por uma escala de 0 (sem perda) e 1 (perda total). Para propriedades, a perda será o valor da edificação; Para pessoas, ela será a probabilidade de que uma vida seja perdida, em um determinado grupo humano que pode ser afetado pelos escorregamentos;

Análise de Risco (*Risk Analysis*): O uso da informação disponível para estimar o risco para indivíduos ou populações, propriedades ou o ambiente. A análise de risco, geralmente, contém as seguintes etapas: Definição do escopo, identificação do perigo e a determinação do risco;

Avaliação do Risco (*Risk Assessment*): O processo de avaliação e análise de risco;

Estimativa do Risco (*Risk Estimation*): O processo usado para produzir uma medida do nível de risco das pessoas, das propriedades ou do ambiente que está sendo analisado. A estimativa de risco envolve as seguintes etapas: Análise da frequência do acidente considerado, análise das conseqüências potenciais relacionadas ao acidente e a integração entre elas;

Cálculo de Risco (*Risk Evaluation*): O estágio no qual valores e julgamentos entram no processo de decisão, explicitamente ou implicitamente, pela inclusão da consideração da importância dos riscos estimados e as conseqüências sociais, ambientais e econômicas associadas, com o objetivo de identificar o leque de alternativas de mitigação destes riscos;

Gerenciamento de Risco (*Risk Management*): O processo completo de avaliação e controle do risco;

Risco Aceitável (*Acceptable Risk*): Nível de risco para o qual, para os propósitos da vida ou trabalho, nós estamos preparados para aceitá-lo como ele é, sem considerar seu gerenciamento. A sociedade geralmente não considera justificável gastos adicionais para redução destes riscos;

Risco Tolerável (*Tolerable Risk*): Um risco que a sociedade está disposta a aceitar para viver com ele a fim de obter certos benefícios líquidos, na confiança de que este risco está sendo propriamente controlado, mantido sob inspeção e que será melhor reduzido como e quando possível;

Risco Individual (*Individual Risk*): O risco de morte e/ou danos para qualquer indivíduo identificável que vive em uma zona exposta ao perigo, ou que segue um padrão particular de vida que o submete às conseqüências deste perigo (de escorregamento no caso);

Risco Social (*Social Risk*): O risco de múltiplos danos ou mortes para toda a sociedade, um risco no qual a sociedade poderá carregar o peso de um acidente causando várias mortes, injúrias, perdas financeiras, ambientais, etc...

Uma resolução da ONU (Organização das Nações Unidas) que proclamou os anos 90 como a década internacional para redução dos desastres naturais - DIRDN, fez com que houvesse um esforço mundial no sentido de mitigar os impactos naturais e também contribuiu para um significativo aumento na produção técnica e científica a respeito do assunto.

Cerri & Amaral (1998) apresentaram um quadro com os principais processos geológicos causadores de acidentes no Brasil, com seus principais condicionantes naturais, as principais ações de indução provocadas pelo homem e exemplos dos danos potenciais gerados por eles, como mostra a tabela 2.9.

Augusto Filho (2001) argumenta que a grande maioria das cartas de risco geológico produzidas no mundo, em especial no Brasil, deveriam se chamar cartas de perigo ou ameaça, já que não estão embutidos nessas a quantificação do risco em termos potenciais por um período de tempo, mas apenas as probabilidades relacionadas a determinados eventos e acidentes geológicos, através da utilização de métodos estatísticos. Esse autor destaca o emprego do termo vulnerabilidade, que, dentro da análise de risco, diz respeito ao elemento ou sistema sob perigo (população, estruturas), servindo como indicador de magnitude das possíveis conseqüências no caso da ocorrência do acidente.

Tabela 2.9 - Processos geológicos causadores de acidentes no Brasil (Cerri & Amaral, 1998)

PROCESSO GEOLÓGICO	CONDICIONANTES NATURAIS	AÇÕES ANTRÓPICAS INDUTORAS	EXEMPLOS DE DANOS POTENCIAIS
Escorregamentos	Encostas com inclinação elevada; depósitos de tálus e colúvios; concentração do escoamento d'água de superfície e de subsuperfície; pluviometria média anual elevada.	Eliminação da cobertura vegetal; cortes estabilizadores; lançamento de lixo; aterro construído sem controle; lançamento de água não controlado; construção de reservatórios (instabilização das margens).	Queda, ruptura e soterramentos bruscos, construções, moradias, estradas, etc.; soterramento e morte de pessoas.
Erosão hídrica (Assoreamento)	Solos arenosos e siltsos pouco coesivos; inclinações acentuadas dos terrenos; concentração do escoamento d'água de superfície e subsuperfície (pipping); chuvas intensas e mal distribuídas no espaço e no tempo.	Eliminação da cobertura vegetal; lançamento concentrado e não dissipado de águas servidas e de chuvas; cortes e aterros não protegidos; construção de vias, caminhos e trilhas que concentram o escoamento; construção de reservatórios (impacto nas margens e a jusante)	Queda de moradias; destruição de ruas e equipamentos urbanos; perda de solo agricultável; soterramento de estradas de estradas e de plantações de várzeas; impactos diversos nos recursos hídricos (poluição, perda de volume, armazenamento, etc.)
Subsidência por adensamento	Planícies ou baixadas com presença de solos moles, continentais ou marinhos.	Obras com fundações inadequadas; escavações sem contenção apropriada; rebaixamento não controlado do lençol freático, super exploração de água subterrânea.	Inutilização de construções devido a recalques excessivos ou mesmo rupturas; rompimento de galerias, encanamentos e tubos subterrâneos; vazamentos.
Colapso de solos	Presença de solos que apresentam recalques importantes quando saturados e submetidos a sobrecargas	Obras que provocam a saturação dos solos de fundação; rompimento de dutos.	Inutilização de construções devido a recalques excessivos ou mesmo rupturas; rompimento de galerias, encanamentos e tubos subterrâneos; vazamentos.
Subsidência e colapso devido a cavidades subterrâneas	Feições cársticas, principalmente cavernas; minerações subterrâneas.	Alterações das condições de fluxo de água subterrânea; superexploração de água subterrânea; escavações subterrâneas instáveis.	Inutilização de construções devido a recalques excessivos ou mesmo rupturas; rompimento de galerias, encanamentos e tubos subterrâneos; vazamentos. (com maior velocidade de manifestação)
Expansão de terrenos	Presença de rochas e solos que apresentam aumento de volume ao serem desconfinados e sob a ação da umidade; presença de argilominerais expansíveis.	Cortes que eliminam camadas superficiais protetoras ou desconfinam o material; cortes que permitem a ação das intempéries.	Instabilizações de taludes, de fundações e de cavidades subterrâneas; ruptura de pavimentos.

2.2 CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA VOLTADA A RISCO

Prandini *et al.* (1990) argumentaram que a geologia de engenharia tem uma grande importância na implementação de políticas de enfrentamento aos acidentes geológicos de caráter tanto emergencial quanto preventivo, através da cartografia geotécnica.

Um mapa de suscetibilidade a escorregamentos, como aquele a ser gerado no presente trabalho, é um tipo de mapa geotécnico. Santos (1990) define mapa geotécnico como um documento complexo, que integra um certo número de dados do solo e do subsolo de uma região, sintetizando-os e integrando-os, prevendo possíveis respostas à intervenção humana, pois o meio físico além de suas potencialidades, também tem suas limitações de uso. O conteúdo de um mapa geotécnico é determinado pelo objetivo que determina a sua aplicação, sem carência nem excessos, para que possa cumprir o papel de orientar o técnico em seu trabalho que pode ser de:

1. Proteção ambiental – contenção de erosão, estabilizações do terreno, controle de poluição, reflorestamento, etc.
2. Agricultura – aproveitamento racional do solo;
3. Urbanismo – orientar o crescimento das cidades, construções, utilização do espaço urbano, etc.
4. Industrialização – escolha de locais adequados para instalações industriais, etc.
5. Mineração;
6. Obras de engenharia em geral.

Cerri (1990) classifica as cartas geotécnicas segundo a etapa em que são produzidos como:

1. Informações básicas – Mapas temáticos, mapas analíticos e mapas básicos;
2. Produto intermediário – Mapas derivados, mapas interpretativos e mapas de síntese;
3. Produto final – cartas geotécnicas, mapas geotécnicos, cartas de planejamento regional, cartas geoambientais, mapas de zoneamento ambiental, mapas de zoneamento geotécnico, mapas de zoneamento urbano, mapas de aptidão, cartas de vulnerabilidade, cartas de suscetibilidade, mapas de potencial natural, mapas de 1^a, 2^a, 3^a Ordens, cartas de risco e zoneamento de risco.

Augusto Filho & Almeida (1990) apresentaram uma metodologia para elaboração da carta geotécnica da Serra do Mar. Nesta, os autores identificaram e cartografaram dezoito classes de suscetibilidade a escorregamentos translacionais do solo, através da análise integrada de três condicionantes básicos: vegetação, declividade e tipologia das encostas.

Vedovello (2000) apresentou um método de cartografia geotécnica, voltada a estudos e atividades de gestão ambiental, a partir de unidades básicas de compartimentação. Essa proposta abrange três etapas: compartimentação fisiográfica dos terrenos, caracterização geotécnica e cartografia final ou de síntese, e foi aplicada na Região Metropolitana de Campinas, trechos de dos municípios de Ubatuba e São Sebastião.

Vários autores consideram que as avaliações de riscos, com vistas à instalação de empreendimentos ou para os objetivos acima citados, também podem ser expressos através de cartas geotécnicas. Neste sentido, Cerri (1990) e Cerri *et al.* (1990a, b) apresentaram trabalho com roteiro metodológico destinado à elaboração de cartas de risco geológico. Esses trabalhos mostram metodologia voltada para a identificação de áreas suscetíveis a instabilizações no trecho paulista da Serra do Mar, propondo medidas para prevenir, reduzir e até mesmo eliminar os riscos.

Zuquette *et al.* (1990), discutindo a aplicação do mapeamento geotécnico na previsão de riscos geológicos em áreas urbanas, agruparam os riscos em quatro grupos baseado nos condicionantes que lhes dão origem: Riscos relacionados a fenômenos naturais, independente da forma de ocupação; riscos associados a fenômenos naturais induzidos pela ocupação em áreas potencialmente problemáticas; riscos provocados por uma ocupação inadequada em áreas sem problemas potenciais, e; riscos decorrentes de limitações do meio físico contornáveis, mas desconhecidos antes da ocupação. Este autor, portanto, também considera que o risco geológico pode ser expresso através de uma carta geotécnica.

Augusto Filho (1990) pondera que para a elaboração das cartas de riscos deveria ser seguidos os seguintes passos: formulação do modelo fenomenológico do processo geológico; elaboração de duas cartas de risco, uma de caracterização/tipologia dos processos geológicos e uma outra de determinação dos dados; análise em mais de uma escala; adoção de um modelo proposto pela

UNDRO (United Nations Disaster Relief Co-Ordinator), utilização de retroanálise e adequação à realidade sócio-econômica e à legislação brasileira.

Zuquette (1993) classifica as cartas geotécnicas quanto ao conteúdo em:

1. Mapas fundamentais – Documentos gráficos que registram as informações sobre os diferentes componentes do meio físico;
2. Cartas derivadas – São elaboradas a partir de um mapa fundamental, atendendo a uma determinada finalidade;
3. Cartas interpretativas – Desenvolvidas a partir de atributos que são registrados nos diferentes mapas fundamentais, onde se incluiriam as cartas de risco.

Cerri & Amaral (1998) definem as cartas de risco como instrumentos cartográficos que apresentam a distribuição, tipo e grau dos riscos geológicos, visando a definição de medidas de prevenção de acidentes.

Zuquette (1993a) apresentou propostas metodológicas para elaboração de cartas de eventos (hazards) e de riscos geológicos, tais como ZERMOS (1973), Stevenson (1984) e Einstein (1988)

Outras propostas metodológicas para cartografia geotécnica podem ser encontradas em Diniz (1998), Bitar *et al.* (1992). Descrição detalhada das metodologias mais empregadas em mapeamento geotécnico podem ser encontradas em Varnes (1974), IAEG (1976), Dearman & Sthachan (1983), Zuquette (1987) e Zuquette & Nagazawa (1998).

2.3 CARTOGRAFIA DIGITAL, SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA E MODELOS QUANTITATIVOS APLICADOS A ESCORREGAMENTOS.

Pode-se dizer que o desenvolvimento da tecnologia computacional e suas aplicações gráficas teve um profundo efeito na cartografia tradicional, revolucionando-a, tanto na forma de produzir quanto na de apresentar esses produtos. Segundo Cromley (1992), a cartografia digital não é apenas uma forma de representar automaticamente um produto obtido manualmente, pois requer também uma diferente organização das funções. Até o início dos anos 1970, o computador era apenas um instrumento utilizado para reproduzir mapas obtidos da maneira tradicional, ou seja, manualmente. Termos como “cartografia automatizada”, “cartografia assistida por computador” e “cartografia auxiliada pelo computador”

(Rhind, 1977, 1980; Boyle, 1979) revelam o desenvolvimento da cartografia digital, mas somente na década de 80, esta tem seu grande desenvolvimento.

Burrough (1987) argumenta que a cartografia digital apresenta uma série de vantagens em relação à cartografia tradicional, uma vez que o ambiente automatizado permite o armazenamento, reprodução de mapas, tabelas e desenhos. Esse autor enumera as seguintes vantagens:

- Elaboração mais rápida de mapas;
- Menor custo na elaboração de mapas;
- Os mapas podem ser elaborados para necessidades específicas de cada usuário;
- Possibilidade de produção de mapas quando equipes especializadas não estão disponíveis;
- Possibilidade de diferentes representações gráficas de um mesmo dado;
- Facilidade na confecção de mapas quando os dados estão no formato digital;
- Facilidade na análise de dados que demandam interações entre análises estatísticas e mapeamento;
- Minimizar o armazenamento de dados em mapas impressos ou analógicos e dessa forma minimizar o efeito do uso de classificações e generalizações.;
- Elaboração de mapas difíceis de serem produzidos manualmente, como por exemplo mapas tridimensionais;
- Criação de mapas nos quais os procedimentos de seleção e generalização são claramente definidos e constantemente executados;
- Possibilidade de revisão de todo processo de elaboração de mapas, o que pode acarretar em aperfeiçoamentos e em economia de tempo e recursos.

As vantagens da cartografia digital em relação à convencional, segundo Augusto (1998) são várias, uma vez que as informações são armazenadas em meio digital, podendo o usuário realizar alterações, observações, atualizações e, principalmente das reproduções dos *layers* de interesse a qualquer momento. Já nos métodos da cartografia convencional ou analógica, as informações são os mapas em papel e qualquer alteração e/ou reprodução depende da realização de um longo e oneroso processo, dependendo da abrangência do projeto.

Os Sistemas de Informação Geográfica possuem ferramentas para cartografia digital, mas uma das suas características mais relevantes é a sua capacidade de combinar e integrar dados de diversas fontes para gerar produtos de fácil

visualização, pois o mesmo possibilita a análise de todas as possíveis e prováveis interações, com o objetivo de estabelecer prognósticos através de modelos empíricos que mostrem, por exemplo, localizações com maiores chances de que ocorram determinados eventos.

A combinação dos dados multi-fontes, segundo Pendock & Nedeliskovic (1996), permite reduzir ambigüidades de interpretações que normalmente podem acontecer quando a análise é feita individualmente.

Existem várias definições para os Sistemas de Informação Geográfica, na literatura especializada, porém todos os autores apresentam os mesmos conceitos básicos.

Segundo Burrough (1987), os Sistemas de Informação Geográfica (SIGs) modernos são o resultado da junção de várias disciplinas e técnicas de processamento de dados com referência espacial tais como computação gráfica, fotogrametria, análises espaciais de dados no formato raster, interpolações de dados pontuais e sensoriamento remoto.

Câmara (1987) pondera que a característica básica de um SIG é sua capacidade de armazenar a topologia de um mapa, entendendo-se como um mapa, uma estrutura de relacionamentos espaciais, que envolve vizinhança, proximidade e pertinência.

Segundo Densham (1991), os Sistemas de Informação Geográfica devem ser aptos a armazenar e manipular dados de localização, topológicos e temáticos para suportar diversos modos de visualização e modelagem.

Eastman (1992) ressalta que na estrutura geral, os principais componentes de um SIG são: sistema de digitalização de mapas, sistema de processamento de imagens, sistema de análise estatística bancos de dados espaciais e de atributos, sistema de gerenciamento de dados, sistema de análise geográfica e, finalmente, sistema de representação cartográfica.

Segundo Davis & Câmara (2001), o requisito para armazenar a geometria dos objetos geográficos e de seus atributos representa uma dualidade básica para SIGs. Para cada objeto geográfico, o SIG necessita armazenar seus atributos e as várias representações gráficas associadas. Devido a sua ampla gama de aplicações, que inclui temas como agricultura, floresta, cartografia, cadastro urbano e redes de concessionárias (água, energia e telefonia), há pelo menos três grandes maneiras de utilizar um SIG:

- Como ferramenta para produção de mapas, neste caso eles funcionariam como um meio para a cartografia digital ;
- Como suporte para análise espacial de fenômenos, que é uma das suas grandes potencialidades;
- Como um banco de dados geográficos, com funções de armazenamento e recuperação de informação espacial.

Atualmente, existe uma infinidade de sistemas no mercado, a escolha por um ou outro deve levar em conta as necessidades do usuário e logicamente a razão custo benefício. Coppock (1995) destaca a importância dessa escolha para evitar gastos maiores do que os necessários na etapa de elaboração da base de dados. O referido autor conclui em seus estudos que o emprego dessa “ferramenta”, no gerenciamento de riscos naturais nos países subdesenvolvidos, depende de uma ótima relação entre recursos necessários para sua implantação e os benefícios que os mesmos proporcionarão, já que os recursos são escassos.

Como pode ser visto pela quantidade de trabalhos que se multiplicam a cada dia, a utilização de recursos disponíveis em SIG apresenta um crescimento muito grande. Para determinados tipos de trabalho os SIGs podem ser considerados essenciais e indispensáveis dado o volume de dados, tempo e complexidade das operações requeridas e, conseqüentemente para a obtenção de resultados mais confiáveis e menos subjetivos. Portanto, apresenta grande potencial para estudos sobre movimentos de massa. Tal fato pode ser comprovado pelo grande número de trabalhos encontrados na literatura, como por exemplo os citados a seguir.

Lombardi & Amaral (1978) discutem a avaliação de riscos associados a escorregamentos através da correlação espacial entre cobertura vegetal e os movimentos gravitacionais de massa em imagens de satélite LANDSAT.

Teixeira *et al.* (1990) elaboraram um mapa de áreas de risco à erosão laminar da Bacia do córrego Monjolo Grande – SP correlacionando um mapa de suscetibilidade natural a erosão laminar com o mapa de uso do solo, utilizando para isso um Sistema de Informação Geográfica.

Peralta (1990), estudando o entorno do reservatório de Itaocara – RJ, identificou as áreas suscetíveis a desmoronamentos e deslizamentos à partir da elaboração de um modelo digital de elevação (MDE) gerado a partir da análise integrada da clinometria, hipsometria, fitologia, geologia e pedologia em ambiente SIG.

Mckean *et al.* (1991) utilizaram técnicas de processamento digital de imagens em SIG para produzir mapas que exploravam o efeito do tipo de vegetação nos movimentos de massa.

Castro (1993) elaborou um roteiro de investigação para obtenção do mapa morfodinâmico do Rio Mogi – Cubatão/SP, em ambiente automatizado. Os graus de instabilidade foram determinados a partir da associação de variáveis ambientais como morfologia, hipsometria, declividade, cobertura vegetal, uso do solo, pluviometria e geologia com a ocorrência de cicatrizes de escorregamento. Riedel (1994) realizou uma avaliação dos condicionantes estruturais na estabilidade de taludes para projetos rodoviários, com o apoio de sensoriamento remoto e Sistemas de Informação Geográfica. Neste trabalho foram enfocadas, a suscetibilidade a escorregamentos planares, em cunha, tombamentos, colapso de blocos e sulcos ou ravinamentos, em função das estruturas geológicas.

Ferreira (1994) descreveu metodologia na qual utilizou técnicas de geoprocessamento para obtenção de mapas de declividade e de orientação de vertentes na bacia de drenagem do rio Ribeirão Alegre – SP.

Ferrari *et al.* (1996) mostraram a correlação entre feições erosivas lineares com a declividade, comprimento da rampa, fator topográfico, erosividade das chuvas e de perda potencial dos solos por erosão laminar.

Brabb (1995) mostrou o resultado de um projeto utilizando Sistemas de Informação Geográfica cujo objetivo foi prevenir as conseqüências de processos geológicos perigosos, incluindo escorregamentos relacionados à falha de San Andrés na Califórnia – EUA.

Diniz (1998) utilizou técnicas de automação e cartografia digital baseada em SIG para elaborar uma base de dados geoambientais do Estado de São Paulo voltado a aplicações como planejamento territorial, gerenciamento de recursos hídricos, gestão ambiental urbana, análise e avaliação de riscos geológicos, com base em informações dos atributos do meio físico (condicionantes geológico-geotécnicos) e dos processos tecnológicos.

Bertagna & Riedel (1999) utilizaram o método de combinação linear ponderada em ambiente SIG para elaborar uma carta de suscetibilidade a escorregamentos na bacia do Rio Perequê na Serra do Mar – SP.

Augusto Filho & Alberto (1999) desenvolveram um estudo comparativo entre métodos manuais e automatizados em SIGs na elaboração de cartas de declividade, fundamentais na elaboração de cartas de risco a escorregamento.

Sestini (2000) apresenta um estudo sobre deslizamentos no Município de Caraguatatuba a partir da análise de variáveis geomorfológicas obtidas de imagens de satélite TM – LANDSAT e tratadas em Sistemas de Informação Geográfica.

Augusto Filho (2001) propõe uma metodologia de elaboração de cartas de risco de escorregamentos, através de uma abordagem quantitativa em ambiente de SIG. Esse trabalho discute ainda a utilização dessas cartas na implementação de planos de seguros.

Modelos estocásticos também encontram um amplo campo de aplicação dentro da cartografia geotécnica, mais especificamente, no que se refere a diagnósticos e previsões com relação a movimentos de massa, sejam esses modelos aplicados dentro do ambiente SIG ou fora dele, em outros sistemas de uso mais específico.

Carrara (1983) utilizou vários tipos de análise multivariada para produzir mapas de perigos de escorregamento nas regiões da Calábria e da Sicília na Itália.

Terlien *et al.* (1995) mostraram exemplos de utilização de modelos geoestatísticos determinísticos e transformação destes em probabilidades, em ambiente SIG para delimitar zonas de acordo com diferentes graus de suscetibilidade a escorregamentos.

Chung *et al.* (1995) mostraram a utilização da análise de regressão multivariada para elaborar um zoneamento de risco de escorregamento, com base na correlação entre diversos mapas temáticos em ambiente SIG.

Carrara *et al.* (1995), estudando uma região em Umbria na Itália, utilizaram um modelo de análise estatística multivariada chamada análise discriminante para elaborar cartas de perigo de escorregamento.

Lineback *et al.* (2001) utilizaram uma modelagem geomatemática em ambiente SIG para predizer a probabilidade condicional de ocorrer escorregamentos com base em atributos topográficos como inclinação e elevação e um índice de umidade em uma bacia de drenagem de um rio em Idaho – EUA.

2.4 MÉTODO BAYESIANO

2.4.1 Introdução

A necessidade crescente de prognosticar a ocorrência de escorregamentos conduziu ao desenvolvimento e aplicação de modelos estocásticos baseados em probabilidades, com ênfase crescente no uso de Sistemas de Informação Geográfica nos últimos 10 anos. Alguns autores como Jibson & Keefer, (1988); Pike, (1988); Carrara, (1989); Carrara *et al.*, (1991); Anbalagan, (1992); Maharaj, (1993); De Young, (1996), Lineback *et al.* (2001) utilizaram aproximações produzidas por modelos estocásticos/estatísticos na forma de análise multivariada das características da paisagem associadas com escorregamentos.

A análise multivariada tem mostrado bons resultados na modelagem de fenômenos naturais, especialmente quando muitos dados não estão disponíveis e a sua obtenção através de medidas diretas é muito complicada e implica em grandes investimentos de tempo e recursos, o que nem sempre está disponível.

A presente pesquisa refere-se a uma análise da suscetibilidade a ocorrência de movimentos gravitacionais de massa, ou escorregamentos propriamente ditos de acordo com a definição genérica de Cruden (1990), que diz que “escorregamento” é um movimento de rocha, terra ou detritos encosta abaixo, enfatizando especialmente a modelagem de dados que parte de um fato concreto para estimar a probabilidade de que o mesmo volte a ocorrer, fazendo isso através de uma correlação de dados probabilísticos.

A correlação de dados espaciais é desenvolvida por meio de equações aplicadas sobre mapas que reúnem vários níveis de informação. Esses mapas são compostos por células de mesmo tamanho, forma e orientação chamados “pixels” distribuídos horizontalmente em níveis de informação, onde as variáveis poderão ser armazenadas em planos individuais. Assim, a integração é feita através da combinação dos atributos que estão ocupando a mesma posição no espaço (x, y) em diferentes planos de informação. O método de análise espacial “bayesiano”, utilizado nesse trabalho, pode muito bem auxiliar na tomada de decisões. Este foi aplicado para avaliar a suscetibilidade a escorregamentos, utilizando para isso regras de inferência estatística em dados georreferenciados, tornando o ambiente de resolução de problemas flexível, para dar suporte a integração de dados para obtenção de mapas de probabilidade.

2.4.2 Descrição do método bayesiano

O método estocástico denominado “aproximação bayesiana” está apoiado principalmente na idéia de probabilidade a priori e a posteriori. Tem como característica a transformação de uma série de dados determinísticos em probabilidades, fazendo uso da inserção de conjuntos para gerar funções de probabilidades condicionais, baseados nos princípios introduzidos por Bayes.

O método bayesiano consiste em determinar a probabilidade de ocorrer um evento, dado a presença de um condicionante, como por exemplo, a probabilidade de ocorrer escorregamento a partir da existência de alguns condicionantes topográficos e/ou geológicos. Esse método é utilizado mais freqüentemente para estabelecer favorabilidade a ocorrências minerais, para o qual tem se mostrado bastante eficiente. (Bonham-Carter, *et al.* 1988), (Bonham-Carter *et al.* 1989), (Agterberg, 1989), (Bonham-Carter & Agterberg, 1990), (Bonham-Carter, 1990), (Bonham-Carter, 1990) (Agterberg *et al.* 1990), (Agterberg, 1992a), (Agterberg *et al.* 1993), (Bonham-Carter *et al.* 1995), (Franca-Rocha *et al.* 2000), (Franca Rocha, 2001), (Moreira, 2001), (Soares *et al.* 2002)

Apesar de ser bastante utilizado em pesquisa mineral, o método bayesiano também apresenta grande potencialidade para aplicação em estudos geológico-geotécnicos. Assim, no presente trabalho, este método foi adaptado para avaliar a probabilidade de ocorrer movimentos de massa e gerar mapa de suscetibilidade quantificada, tendo sido escolhida como área de aplicação o Município de São Sebastião no litoral Norte do Estado de São Paulo.

A seguir, descreve-se o modelo utilizado no trabalho, baseado nos modelos adotados por Agterberg (1989), Bonham-Carter *et al.* (1989) e Bonham-Carter (1994), aplicados à prospecção mineral, adaptado aqui para suscetibilidade a movimentos de massa. No presente trabalho, a probabilidade de ocorrer o evento será designada pela letra “P”, evento de escorregamento pela letra “E”, e a evidência (condicionante) pela letra “B”. Assim, 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:

$$P(E|B) = \frac{P(E \cap B)}{P(B)} \quad \text{Equação 2.1}$$

Onde,

$P(E | B)$ = probabilidade condicional de ocorrer o evento E, dado a evidência B

e,

$P(E \cap B)$ = Proporção da área total ocupada por E e B ao mesmo tempo (área de intersecção entre o eventos E e a evidência B).

Dessa forma, $P(E \cap B) = N(E \cap B) | N(T)$, onde

$N(E \cap B)$ corresponde a área de intersecção entre o evento e a evidência, e

$N(T)$ = Área total de interesse na pesquisa.

Da mesma forma, $P(B) = N(B) | N(T)$, onde

$N(B)$ corresponde a área onde ocorre a evidência.

Substituindo-se o segundo membro da equação 2.1, obtém-se:

$$P(E | B) = \frac{N(E \cap B)}{N(B)} \quad \text{Equação 2.2}$$

As formulações apresentadas até o momento não demonstram a possibilidade de representação da probabilidade condicional em termos da probabilidade a priori, acrescida de um fator multiplicativo. Esta equação é então obtida e o desenvolvimento da equação é apresentado a seguir. Em primeiro lugar, a probabilidade a posteriori da evidência, dado que está na área de ocorrência do evento é:

$$P(B | E) = \frac{P(B \cap E)}{P(E)} \quad \text{Equação 2.3}$$

Pela teoria das probabilidades, sabe-se que $P(B \cap E) = P(E \cap B)$, assim combinando-se as equações 2.1 e 2.3 obtém-se:

$$P(B | E) = P(E) * \frac{P(E | B)}{P(B)} \quad \text{Equação 2.4}$$

Em Bonham-Carter (1994), é proposto ainda um outro tipo de formulação, expressa pelo cálculo da chance a priori $O(E)$, e da chance a posteriori $O(E | B)$.

Esta formulação permite a integração de diferentes evidências, como fatores que explicam a ocorrência do evento através da soma condicional de parâmetros.

Assim, a chance a priori é expressa por:

$$O(E) = \frac{P(E)}{1 - P(E)} \quad \text{Equação 2.5}$$

Onde $P(E)$ é a probabilidade a priori.

A chance a posteriori é obtida a partir do desenvolvimento da probabilidade a priori como mostra a equação 2.4.

Uma expressão similar pode ser derivada da probabilidade posterior quando um evento E está presente, porém a evidência está ausente, como mostra a expressão a seguir:

$$P(E | \bar{B}) = P(E) \frac{P(\bar{B} | E)}{P(\bar{B})} \quad \text{Equação 2.6}$$

Dividindo-se os dois termos da equação por $P(B | E)$, tem-se:

$$\frac{P(E | B)}{P(\bar{E} | B)} = \frac{P(E) * P(B | E)}{P(\bar{E} | B) * P(B)} \quad \text{Equação 2.7}$$

Substituindo o $P(E | \bar{B})$ do segundo termo da equação 2.7, tem-se:

$$\frac{P(E | B)}{P(\bar{E} | B)} = \frac{P(E) * P(B | E) * P(B)}{P(\bar{E}) * P(B | \bar{E}) * P(B)} \quad \text{Equação 2.8}$$

Onde,

$$O(E | B) = O(E) * \frac{P(B | E)}{P(B | \bar{E})} \quad \text{Equação 2.9}$$

Nesta equação, o termo $\frac{P(B | E)}{P(B | \bar{E})}$ é denominado Razão de Suficiência (LS)

A chance de ocorrência é obtida de forma semelhante, dada a ausência de evidência.

$$O(E \setminus \bar{B}) = O(E) * \frac{P(\bar{B} | E)}{P(\bar{B} | \bar{E})} \quad \text{Equação 2.10}$$

Na equação $\frac{P(\bar{B} | E)}{P(\bar{B} | \bar{E})}$ é chamado Razão de Necessidade (LN)

Extraindo-se o logaritmo natural das equações 2.9 e 2.10, tem-se:

$$\text{Ln}[(E | B)] = \text{Ln}[E] + W^+ \quad \text{Equação 2.11}$$

e,

$$\text{Ln}[(E | \bar{B})] = \text{Ln}[E] + W^- \quad \text{Equação 2.12}$$

Segundo Rostirolla, (1996) um dos requisitos mais importantes para avaliação da favorabilidade consiste na análise da necessidade e da suficiência dos atributos considerados como evidências. Dessa forma, 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.

As razões de suficiência (LS) e de necessidade (LN) são computadas dependendo da presença ou ausência da evidência para um determinado ponto. A condição de suficiência de uma evidência "B" é satisfeita quando a probabilidade de ocorrência de um evento é maximizada ($P(B|E) = \text{máximo}$). A condição de necessidade da evidência, por sua vez, é satisfeita quando a probabilidade de não ocorrência do evento é maximizada com a não existência da evidência $P(\bar{B} | \bar{E} = \text{máximo})$.

Chung *et al.* (1992) estabeleceram empiricamente conceitos de condição de necessidade e suficiência das variáveis ou evidências, a partir das comparações entre as distribuições em área das evidências e dos eventos conhecidos, concluindo 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.

Conforme demonstração feita por Bonham-Carter (1994), para um número maior de evidências, estas seriam integradas através de formulação que computaria a chance a priori, adicionada ao somatório dos logaritmos naturais das razões de suficiência e/ou necessidade. Contudo, segundo Agterberg (1989), é necessário que as evidências consideradas apresentem uma independência condicional.

Essa obrigatoriedade de assumir a independência condicional na combinação de evidências múltiplas decorre do fato de que os ponderadores são calculados independentemente para cada evidência, sendo posteriormente combinados em uma única equação. Essa imposição matemática possibilita uma simplificação na formulação e quando bem empregada fornece uma idéia da contribuição individual de cada evidência.

A probabilidade de ocorrer um evento dado duas evidências é expressa por:

$$P(E | B_1 \cap B_2) = \frac{P(E \cap B_1 \cap B_2)}{P(B_1 \cap B_2)} \quad \text{Equação 2.13}$$

De outra forma,

$$P(E | B_1 \cap B_2) = \frac{P(B_1 \cap B_2 | E) * P(E)}{P(B_1 \cap B_2)} \quad \text{Equação 2.14}$$

e,

$$P(E | B_1 \cap B_2) = \frac{P(B_1 \cap B_2 | E) * P(E)}{P(B_1 \cap B_2 | E) * P(E) + P(B_1 \cap B_2 | \bar{E}) * P(\bar{E})} \quad \text{Equação 2.15}$$

Esta é a regra bayesiana onde, segundo BONHAM-CARTER (1984) existem apenas duas hipóteses exclusivas, $Ee\bar{E}$, com $P(E) + P(\bar{E}) = 1$. Os efeitos da intersecção entre as duas evidências B_1 e B_2 podem ser ignoradas quando a independência condicional entre as duas evidências for respeitada. Isso possibilita uma simplificação ao permitir uma avaliação individual dos efeitos de cada plano de

evidência binário, além de permitir a combinação dos fatores através de uma multiplicação direta.

A independência condicional, referida anteriormente, pode ser expressa através da equação:

$$P(B_1 \cap B_2 | E) = P(B_1 | E) * P(B_2 | E) \quad \text{Equação 2.16}$$

e,

$$P(E | B_1 \cap B_2) = P(E) * \frac{P(B_1 | E)}{P(B_1)} * \frac{P(B_2 | E)}{P(B_2)} \quad \text{Equação 2.17}$$

Essa equação possibilita a multiplicação separada dos fatores de cada plano de informação (evidência). Pode-se perceber que as equações são iguais, exceto pelos fatores de multiplicação das duas evidências, usados para atualizar a probabilidade a priori e gerar a probabilidade a posteriori. Assim, usando a chance a probabilidade condicional ou a posteriori pode ser expressa por:

$$O(E | B_1 \cap B_2) = O(E) * LS_1 * LS_2 \quad \text{Equação 2.18}$$

Representando essa mesma equação através do logaritmo natural, temos então: desta equação:

$$\ln[O(E | B_1 \cap B_2)] = \ln[O(E)] + W_1^+ + W_2^+ \quad \text{Equação 2.19}$$

Quando os radicais 1 e 2 referem-se às razões de probabilidade ou pesos determinados independentemente por mapas indicativos 1 e 2. A equação 2.19 mostra apenas uma das possíveis combinações considerando apenas duas evidências. Qualquer que seja a formulação usada deste modelo, são possíveis quatro combinações diferentes de duas evidências binárias. Para a equação 2.19 as duas evidências estão presentes. As outras três combinações possíveis são: $((W_1^+ + W_2^-))$ ou $((W_1^- + W_2^+))$ ou $((W_1^- + W_2^-))$ dependendo da presença ou ausência de "W".

Segundo Moreira (2001), essa soma de W^+ ou W^- , pode ser efetuada para todos os pontos de análise, a partir de uma operação condicional, controlada

especialmente pela presença ou ausência da classe favorável de cada evidência. Assim, caso o primeiro ponto do mapa apresente a evidência “i”, na soma o valor de W^+ é computado, e no caso de a evidência não estar presente, então o valor de w^- é computado. A mesma operação é repetida para todas as evidências naquele ponto até que todas elas tenham sido computadas.

O valor final naquele determinado ponto (chance a posteriori) é então dado pela somatória condicional dos valores de W^+ e W^- adicionados a probabilidade à priori. O procedimento é repetido para todos os pontos até que a grade inteira tenha sido completada. Como resultado final é uma grade regular com valores indicando a probabilidade condicional ou a posteriori de ocorrer um determinado evento. A formulação que expressa essa situação é dada por:

$$O(E | B_1 \cap B_2 \cap \dots \cap B_n) = \ln[O(E)] + \sum_{i=1}^n ((\mu_i = \text{favorável})? W_i^+ : W_i^-) \quad \text{Equação 2.20}$$

Com o plano de informação da chance a priori gerado, é aplicada uma expressão matemática para a geração do plano de informação a posteriori. Assim,

$$P(E | B) = \frac{O(E | B)}{1 + O(E | B)} \quad \text{Equação 2.21}$$

Com três evidências, há 2^3 ou 8 possíveis combinações e em geral com n mapas há 2^n possíveis diferentes combinações. Dessa forma, a expressão geral para combinar $i = 1, 2, 3, \dots, n$ planos de informação é:

Para razões de probabilidade

$$O[E(B_1 \cap B_2 \cap B_3 \cap \dots \cap B_n)] = O(E) * \prod_{i=1}^n LS_i \quad \text{Equação 2.22}$$

Ou para pesos

$$\ln(E | B_1 \cap B_2 \cap B_3 \cap \dots \cap B_n) = \ln(E) + \sum_{i=1}^n W^+ \quad \text{Equação 2.23}$$

Essas são fórmulas computadas para combinar um grupo de mapas binários de evidência através do modelo bayesiano. Nessas equações gerais, LS torna-se LN e w^+ torna-se w^- , se o mapa que representa a evidência estiver ausente ao invés de presente. Em locais onde não há dados para um plano de informação em particular, a razão de probabilidade é ajustada para 1 e o peso ajustado para zero.

2.4.3 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:

$$P(A|B) = P(A) \qquad \text{Equação 2.24}$$

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 violada em algum grau, e em função disso surgem algumas questões como: O quanto séria é essa violação?; este fato pode acarretar distorção nos resultados? O que pode ser feito para mitigar os efeitos da violação da independência condicional? Quando é aplicada a análise nos dados, a independência condicional 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 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 é 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.

Algum grau de violação da independência estatística ou condicional sempre ocorre, segundo Bonham-Carter (1994), e a probabilidade de que isto ocorra, cresce, à medida que novos mapas de evidências são incorporados ao modelo. 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. Problemas na independência condicional podem ser verificados visualmente, ou melhor ainda, por meio de testes de ajuste estatístico. Se um mapa de evidência compromete frontalmente a independência estatística, este mapa pode ser (1) rejeitado do modelo, (2) combinado com outro mapa para reduzir a dependência, ou ainda, (3) ser modificado até corrigir o problema (Agterberg, 1989; Agterberg *et al.*, 1990; Bonham-Carter, 1994).

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.

Segundo Moreira (2001), dados espaciais normalmente não satisfazem à suposição de modelos estatísticos clássicos, particularmente com relação à independência das amostras. Como exemplo, mostra a suposição de que dois mapas binários serão comparados em uma série de pontos escolhidos aleatoriamente. Se a distância média entre a localização das amostras nos dois mapas é grande, a suposição de independência condicional é aceitável. Se, ao contrário, essa distância é pequena, em função do aumento do número de pontos de amostragem, essas amostras não poderão mais ser consideradas independentes estatisticamente. É claro que quanto maior for o número de amostras em uma base

de dados espacial, mais próxima elas estarão e conseqüentemente, maior será a autocorrelação espacial.

A independência entre dois padrões B_1 e B_2 estatisticamente é dada por:

$$P(B_1 | B_2) = P(B_1) \text{ e } P(B_2 | B_1) = P(B_2) \quad \text{Equação 2.25}$$

Essa formulação indica que a presença de B_1 (probabilidade condicional B_1) é independente da presença ou ausência da probabilidade condicional B_2 e vice-versa. Por sua vez, se dois planos de informação binários são independentes com relação a um conjunto de eventos, a seguinte formulação mostra isso:

$$P(B_1 \cap B_2 | E) = P(B_1 | E) * P(B_2 | E) \quad \text{Equação 2.26}$$

Essa equação também pode ser escrita da seguinte maneira:

$$N(B_1 \cap B_2 \cap E) = \frac{N(B_1 \cap E) * N(B_2 \cap E)}{N(E)} \quad \text{Equação 2.27}$$

Onde,

$N(B_1 \cap B_2 \cap E)$ representa o número de eventos que ocorrem nas regiões onde os padrões B_1 e B_2 estão presentes;

$\frac{N(B_1 \cap E) * N(B_2 \cap E)}{N(E)}$ representa o número de eventos esperados onde ocorre sobreposição dos padrões B_1 e B_2 , que deve ser igual ao número de eventos sobre B_1 , multiplicado pelo número sobre B_2 , dividido pelo número total de eventos no caso de os dois padrões terem independência condicional.

Para avaliar a independência condicional, Bonham-Carter (1994) sugere a aplicação de dois testes de ajuste estatísticos, que ele chama de 'Pairwise test' ou qui-quadrado e 'Overall test', traduzidos por Franca-Rocha (2001) como pareado e global, respectivamente. Estes testes baseiam-se na relação entre o número de ocorrências observadas e o número de ocorrências previstas.

2.4.3.1 Teste qui-quadrado

Bonham-Carter (1994) sugere a utilização do teste estatístico qui-quadrado χ^2 para medir a independência condicional entre todos os possíveis pares de mapas de evidências de classes binárias. Neste método, a matriz de tabulação cruzada é utilizada como matriz de contingência. Tomando-se como exemplo uma tabela de tabulação cruzada entre dois planos de informação “A” e “B” chamada matriz “T”, com elementos T_{ij} , onde há $i=1, 2, \dots, n$ classes do plano de informação B (linhas da tabela) e $j=1, 2, \dots, m$ classes do mapa A (colunas da tabela). Os totais das margens da tabela T são definidos como de $T_{i.}$ para a soma das i-th linhas e $T_{.j}$ para a soma das j-th colunas, e $T_{..}$ para a soma total de linhas e colunas. Se dois planos de informação são independentes um do outro, sem nenhuma correlação entre eles, a área esperada em cada categoria de sobreposição é dada pelo produto dos totais das margens, dividido pelo total geral (absoluto). Assim, a área esperada T_{ij}^* para i-th linha e j-th coluna é dada pela seguinte expressão:

$$T_{ij}^* = \frac{T_{i.} * T_{.j}}{T_{..}} \quad \text{Equação 2.28}$$

De onde deriva-se a estatística do qui-quadrado, χ^2 expressa pela seguinte expressão matemática:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{(T_{ij} - T_{ij}^*)^2}{T_{ij}^*} \quad \text{Equação 2.29}$$

Onde T_{ij}^* é o valor esperado, quando da sobreposição entre as classes T_{ij} e o valor observado (observado-esperado)²/esperado, o qual tem o limite inferior igual a zero quando áreas observadas são exatamente iguais as áreas esperadas e os dois mapas são completamente independentes. Como áreas observadas, tornam-se cada vez diferentes das áreas esperadas, o teste qui-quadrado aumenta em magnitude e passa a ter um limite superior variável. Por causa disso, Bonham-Carter (1994) propõe a utilização de dois coeficientes de associação baseados em valores

do qui-quadrado que são o coeficiente de Cramer “V” e o coeficiente de contingência, definidos respectivamente pelas seguintes equações:

$$V = \sqrt{\frac{\chi^2}{T_{..} + M}} \quad \text{Equação 2.30}$$

e,

$$C = \sqrt{\frac{\chi^2}{T_{..} + \chi^2}} \quad \text{Equação 2.31}$$

2.4.5 Teste global

O Teste global de Bonham-Carter (1994) é empregado após a modelagem, considerando toda esta, quando todos os mapas de evidências foram combinados, para medir a independência condicional entre esses. O método global é um procedimento muito simples, que consiste na comparação entre as ocorrências observadas e prognosticadas. Se o número total de ocorrências esperadas é bem maior que o número total de ocorrências observadas (10 a 15% maior) significa que a independência condicional está sendo violada e nesse caso faz-se necessário a realização de novos testes pareados (qui-quadrado) para detectar qual plano ou quais planos de informação (mapas de evidências) estão contribuindo ou provocando essa violação na independência estatística.

Assim,

$$N(E)_{calc} = \sum_{k=1}^m P_k N(A)_K \quad \text{Equação 2.32}$$

Bonham-Carter (1994) afirma que, ao contrário do teste de ajuste qui-quadrado, o teste de ajuste global não pode ser considerado um teste formal e, estudando a aplicação desse teste ao mapeamento do potencial mineral, esse autor observa que o número de depósitos prognosticados pela modelagem pesos das evidências é sempre maior que o número de depósitos observados. O teste global pode ser avaliado também através do cálculo das estatísticas ‘Kolmogorov-Smirnov’

ou K-S (não paramétrico). O teste K-S baseia-se no desvio máximo do número de ocorrências observadas em relação ao número de ocorrências prognosticadas, sendo mais bem usado nos casos em que o modelo esperado possa ser inteiramente especificado.

2.4.4 Reclassificação binária

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). Bonham-Carter (1994).

Esse autor propõe a utilização de um parâmetro para determinar estatisticamente o limiar de corte, denominado contraste (C_w). Esse parâmetro é utilizado normalmente para evitar extremos, onde poucas classes podem ser consideradas favoráveis ou muitas, o que pode acontecer com o julgamento subjetivo realizado por especialistas. O contraste é determinado através do cálculo de ponderadores, obedecendo às seguintes formulações:

$$C_w = \ln(O | A) - \ln(O | \bar{A}) \quad \text{Equação 2.33}$$

Ou ainda,

$$C_w = W^+ + W^- \quad \text{Equação 2.34}$$

2.4.5 Pesos de evidência

O método quantitativo Pesos das Evidências (Weights-of-evidence) utiliza uma formulação log-linear do Teorema de Probabilidade de Bayes, descrito anteriormente, 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.

Segundo Raines *et al.* (2000), 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. Spiegelhater & Knill-Jones, (1984). Nesta aplicação, a evidência consistiu em um conjunto de sintomas, e a hipótese era se o paciente tem 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.

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 WOFE. Essa extensão usa um método quantitativo denominado “pesos de evidência”, adaptado para mapear o potencial mineral usando Sistemas de Informação Geográfica.

Esta extensão foi programada a partir das rotinas desenvolvidas originalmente em FORTRAN e em linguagem de modelagem por Bonham-Carter e colaboradores (Bonham-Carter, 1994; Bonham-Carter *et al.*, 1998). O método permite a seleção dos mapas de evidências e o cálculo dos ponderadores para a composição de mapas de favorabilidade dentro do próprio ambiente SIG, apresentando a vantagem de dispensar as etapas de conversão e exportação/importação de arquivos externamente ao SIG o que é um processo muitas vezes dispendioso e cansativo.

Segundo Franca Rocha (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. O método WOFE consiste na combinação de vários padrões binários para prognosticar outro padrão binário.

A extensão Arc-WOFE usa a associação estatística entre ocorrências e as possíveis evidências que condicionem ou que sejam indícios da ocorrência. Por exemplo, a associação entre ocorrências minerais e as evidências que seriam o tipo

de rocha, medidas geoquímicas ou geofísicas para determinar os pesos. O produto final é um mapa resultado da combinação dos pesos das variáveis, que estão relacionadas à ocorrência (diagnósticas), para expressar a probabilidade de uma célula conter a ocorrência.

Os valores dos pesos são interpretados da seguinte maneira: Um peso positivo para um valor particular do mapa de evidência indica que ocorrências são mais freqüentes do que o esperado pelo cálculo da chance, enquanto valores negativos indicam o contrário, ou seja, ocorrências são menos freqüentes do que o valor esperado pelo cálculo da chance. Um peso de zero indica que não há correlação espacial entre o tema analisado e a ocorrência.

3. MATERIAIS E PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A metodologia que foi empregada no presente trabalho é baseada no método científico para as análises fenomenológicas da Geologia de Engenharia ou método das hipóteses progressivas, proposto por SANTOS (1994). Segundo este autor, o caminho para se chegar a diagnósticos seguros passa por um contínuo processo de adoção de hipóteses fenomenológicas e de aferição destas, através do empenho observativo e experimental, ou seja da investigação orientada de dados que para tanto se mostrem sugestivas ou se façam necessárias.

Segundo Santos (1984), à Geologia de Engenharia como ciência cabe, a partir de seus fundamentos filosóficos, a responsabilidade técnica de diagnosticar e entender os fenômenos geológico-geotécnicos que possam resultar de interação de solicitações globais, regionais ou locais (obras, serviços, atividades urbanas e rurais) do meio físico geológico com os processos e características deste meio. Esta proposta aponta três fases da pesquisa (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 – Síntese do método das hipóteses progressivas. (SANTOS, 1994)

FASES	OBJETIVOS
1^A FASE 1 ^a Hipótese	Localização e circunscrição preliminar do problema. Reunião dos dados disponíveis. Adoção de uma primeira hipótese orientativa
2^A FASE Diagnóstico definitivo.	Investigação orientada, aferição da hipótese anterior e adoção de novas hipóteses até formulação do diagnóstico definitivo.
3^A FASE Fechamento	Investigação e sistematização orientadas. Circunscrição, descrição final do fenômeno através da qualificação e quantificação, dinâmica de desenvolvimento e previsão de comportamento.

Dentro do que foi considerado como primeira fase, de acordo com a proposta metodológica apresentada, as várias etapas de trabalho serão descritas a seguir. Os resultados e conclusões do trabalho, apresentados nos capítulos 5 e 6, encaixam-se na segunda e terceira fases.

3.1 SELEÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área escolhida para este estudo é um trecho do Município de São Sebastião, litoral norte do Estado de São Paulo incluindo sua porção norte, junto ao limite com o Município de Caraguatatuba e seus arredores (Figura 3.1).

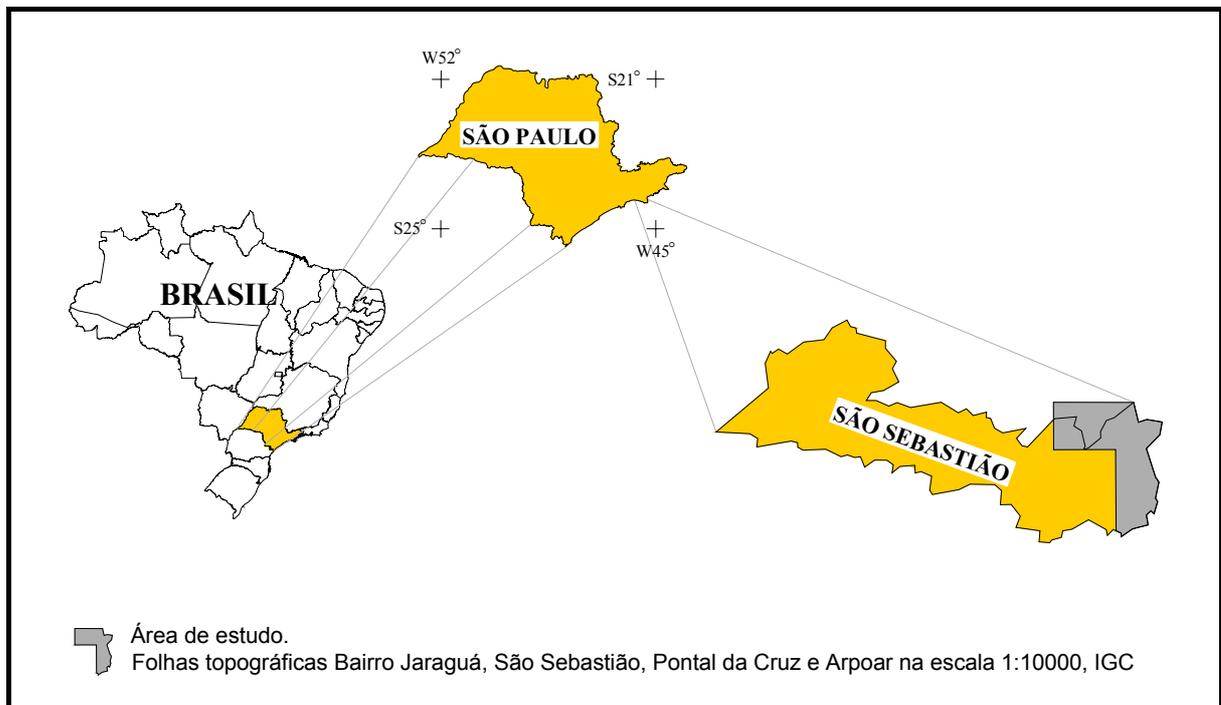


Figura 3.1 - Localização da área de estudo

Os critérios utilizados para a escolha da área levaram em consideração os seguintes fatores, indispensáveis para a abordagem da temática proposta:

1. Área com existência de cicatrizes de escorregamentos que correspondem 'as evidências do processo (probabilidade a priori).
2. Disponibilidade de dados, como bases topográficas confiáveis em escala de detalhe 1:10.000, mapas geológicos, geomorfológicos e de vegetação.

3. Disponibilidade de fotografias aéreas e imagens de satélite, com coberturas de pelo menos três datas diferentes para o acompanhamento da evolução da ocupação urbana.

Além disso, trata-se de uma área de grande interesse econômico, com atividades comerciais, industriais, portuárias, com um imenso potencial ecoturístico e que concentra uma grande mancha de mata atlântica em encostas íngremes, o que justifica o interesse científico que essa área têm despertado, particularmente em relação às avaliações sobre risco associado a escorregamentos.

3.2 ESTABELECIMENTO DE HIPÓTESE ORIENTATIVA

Seguindo os preceitos metodológicos adotados, definiu-se a seguinte hipótese orientativa de trabalho:

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

3.3 DEFINIÇÃO DOS CONDICIONANTES (EVIDÊNCIAS) UTILIZADOS NA ANÁLISE

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, para gerar um tipo de cartografia geotécnica 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 vegetal e Geomorfologia incluindo aqui forma das encostas, declividade, exposição das vertentes, hipsometria e energia do relevo.

A pluviosidade não foi incluída na modelagem, por não ser considerada um condicionante, mas sim o principal agente deflagrador dos escorregamentos.

3.4 LEVANTAMENTO DOS DADOS DISPONÍVEIS

No que diz respeito aos dados disponíveis, no início do trabalho 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, confeccionadas pelo Instituto Geográfico e Cartográfico do Estado de São Paulo;
- Mapa geológico, na escala 1:50.000, modificado de Maffra (2000)
- Mapa geomorfológico, modificado de IG (1996), escala 1:50.000;
- Mapa de cobertura vegetal (Crepani & Medeiros, 2000), escala 1:50.000
- Dados relativos à pluviometria dos postos pluviométricos do DAEE E2-46 (Caraguatatuba), E2-128 (Porto novo), E1-004 (Picinguaba), E2-009 (Mato Dentro) E2-052 (Ubatuba), E2-122 (Maranduba) E2-045 (São Francisco) E2-124 (Maresias), E2-012 (Ilhabela) e E2-142 (Burritas), fornecidos pelo IG-

SMA, complementados com dados do “Banco de Dados Pluviométricos do Estado de São Paulo” *on line* <http://www.recursoshidricos.sp.gov.br/>

- Softwares AutoCad[®] R14 e AutoCad[®] R2000 (Autodesk), Excel for Windows 98 (Microsoft), Arcview 3.2 (Esri)

3.5 ELABORAÇÃO DA BASE DE DADOS EM SIG

A base de dados em formato digital, contendo os diversos planos de informação devidamente georeferenciados é um componente essencial e indispensável em qualquer projeto que envolva análise espacial em ambiente SIG. Isso permite que todas as informações disponíveis sobre um determinado assunto possam ser facilmente acessadas, que se estabeleçam todas as possíveis correlações sobre temas e que se façam diversos tipos de operações matemáticas sobre os dados, desde as mais simples até as mais sofisticadas, dependendo do que se deseje e do sistema escolhido.

Tendo em vista a ausência de dados em formato digital, já prontos para análise, há a necessidade de reunir esses dados de diversas fontes, que geralmente estão no formato analógico. Por esse motivo, o planejamento e construção de um banco de dados georreferenciado constituem, sem nenhuma sombra de dúvida, a tarefa mais árdua e demorada de um projeto dessa natureza, pois envolve, além da dificuldade de reunir esses dados, muitos esforços dispendidos com digitalização e conversão de dados entre diferentes formatos, já que antes da análise espacial em SIG, vários softwares com funções específicas são utilizados. Dessa forma, para a realização desse trabalho foi reunida e sistematizada uma série de dados do meio físico, considerados importantes por influir no desencadeamento de movimentos de massa.

Com relação à adequação dos dados para a utilização em Sistemas de Informação Geográfica, foram efetuadas as seguintes etapas, relativas a entrada de dados:

3.5.1 Criação de mapa base

Com o objetivo de assegurar a existência de limites comuns no SIG, e assim evitar erros em produtos de sobreposição, primeiramente foi digitalizado um mapa base, contendo os elementos comuns a todos os temas utilizados no trabalho, como os corpos d'água principais e os limites da área. A partir daí, não foram feitas quaisquer mudanças nesta base e todas as cartas foram digitalizadas a partir desta.

3.5.2 Digitalização dos mapas temáticos existentes

A entrada de dados gráficos foi efetuada manualmente via mesa digitalizadora, utilizando-se para isso as versões R14 e R2000 do *software* AutoCad. A calibração das cartas na mesa foi realizada com pontos diagonais conhecidos, em coordenadas planas UTM. Cada unidade dentro de cada tema, como por exemplo unidades geológicas, etc. foi digitalizada em um layer distinto, com o objetivo de facilitar uma identificação rápida destas unidades quando necessário. Nessa fase, a maior dificuldade foi a digitalização dos mapas topográficos, pois a escala dos mesmos é 1:10.000 e as curvas apresentam equidistância de 5m em uma região com grandes desníveis. Essa etapa é importante porque erros cometidos podem se propagar indefinidamente, comprometendo a qualidade do produto final. Vários tipos de erros são podem ser incorporados ao processo. Burrough (1989) considera as seguintes fontes de erro:

Fontes de erros diversas

Idade dos dados; insuficiente cobertura da área de estudo; escala dos mapas; densidade das observações; representatividade dos dados; conversão de dados de diferentes formatos, para um formato único; possibilidade de acesso.

Erros resultantes de variações naturais ou de medições

Precisão de posicionamento; precisão de conteúdo (qualitativa e quantitativa); variação devido à entrada e saída de dados, erro de observação e variação natural.

Erros produzidos pelo processamento

Erros numéricos nos computadores; erros metodológicos (lógica e sobreposição); problemas de classificação e generalização: metodologia, definição de intervalos de variação e interpolação.

Segundo Quintanilha (1995), as principais preocupações com o documento de entrada são referentes ao seu tamanho e à complexidade. O tamanho, quando o documento não se adequar aos formatos padrão de desenho, pode implicar no particionamento do desenho e dos arquivos. A complexidade refere-se a linhas muito próximas e/ou com diferentes espessuras ou cores, as quais dificultam a discriminação entre elas pelo operador e geram arquivos grandes e imprecisos, como é o caso de curvas de nível em regiões muito íngremes.

A entrada de dados é sem dúvida uma das etapas mais importantes e dispendiosas na realização de um trabalho onde se pretenda utilizar um Sistema de Informações Geográficas. Para Tomlinson *et al.* (1976), no desenvolvimento de um projeto, 60% do tempo são utilizados na entrada de dados, incluindo digitalização, edição e correção dos erros de digitalização.

Os erros no processo de aquisição de dados, segundo Melo & Cintra (1993) podem estar associados aos erros de execução dos mapas e aos erros da digitalização em si. Os erros de execução surgem quando os mapas são elaborados e podem ser resultantes da demarcação dos pontos de controle, na fusão de dados provenientes de escalas diferentes, no processo de desenho, na reprodução, do tipo de papel utilizado e na generalização de feições entre outros. A quantificação desses erros é muito difícil.

Os erros de digitalização estão associados a erros da fonte ou deformabilidade da base, erros do operador em seguir as linhas, erros da mesa digitalizadora e erro de calibração da mesa entre outros.

3.5.3 Edição dos mapas digitalizados

A qualidade dos dados é de fundamental importância para a obtenção de um resultado satisfatório. Erros de digitalização podem provocar outros erros quando os dados forem manipulados em SIGs. Segundo Melo & Cintra (1993), as funções de

geocodificação, superposição, generalização e análise podem ampliar os erros devido à digitalização.

Os erros de digitalização mais comuns, diagnosticados e corrigidos nesta fase do presente trabalho, foram polígonos abertos, linhas comuns a dois polígonos não sobrepostas completamente, pequenos polígonos incorretamente digitalizados, quando na verdade não existem, linhas ultrapassando o limite do polígono e linhas terminadas antes do limite do polígono.

3.5.4 Entrada de dados numéricos

Os dados numéricos são principalmente os relativos à pluviosidade, fornecidos pelo IG-SMA (Instituto Geológico – secretaria do meio Ambiente do Estado de São Paulo), complementados com dados do “Banco de Dados Pluviométricos do Estado de São Paulo”, armazenados criteriosamente para tratamento, em bancos de dados no programa Excel.

3.5.5 Escolha do software

O sistema escolhido para o desenvolvimento deste trabalho foi o ARC VIEW 3.2, nos módulos “*Spatial Analyst*” e “3D” e a rotina ARCWOFE (pesos de evidência), desenvolvida em uma linguagem de programação compatível com o ARCVIEW. Esse sistema é composto por vários módulos, com objetivos e funções específicas para aplicações dentro da análise espacial, incluindo análise ambiental, exploração mineral, silvicultura, planejamento do uso da terra, planejamento regional, gerenciamento de recursos hídricos, mapeamento de vários recursos, serviços de defesa e inteligência, pesquisas de solos, ciências marinhas, planejamento de sistemas de transportes, demografia, pesquisas de marketing, serviços governamentais e estudos econômicos.

3.5.6 Modelagem dos dados

Modelar dados significa estabelecer medidas e padrões de propriedades e relacionamentos, através de técnicas de inferência espacial sobre processos que ocorrem distribuídos sobre um determinado espaço.

Câmara *et al.* (1995) define um modelo de dados como um conjunto de ferramentas conceituais, utilizado para estruturar dados num sistema computacional. O modelo descreve a forma de apresentação no computador. Ampla discussão a cerca da modelagem de dados em geoprocessamento pode ser encontrada em Câmara *et al.* (*op. cit.*)

Câmara *et al.* (2002) afirma que a análise espacial é composta por um conjunto de procedimentos encadeados cuja única finalidade é a escolha de um modelo inferencial que considere explicitamente o relacionamento espacial presente no fenômeno. Segundo o mesmo, os procedimentos iniciais da análise incluem o conjunto de métodos genéricos de análise exploratória e a visualização dos dados, em geral através de mapas, técnicas essas que permitem descrever a distribuição das variáveis de estudo, identificar observações atípicas tanto em relação ao tipo de distribuição quanto aos vizinhos e buscar a existência de padrões na distribuição espacial.

Com base nesses conceitos, buscou-se nesse trabalho, mensurar quantitativamente a favorabilidade a escorregamentos através de uma modelagem estocástica, considerada bastante sofisticada pela capacidade de estimar um parâmetro a partir do registro de eventos distribuídos sobre uma determinada área, e pelo estudo de vários condicionantes existentes nessa área.

O objetivo foi combinar vários condicionantes/evidências para gerar um produto que mostre valores, como a probabilidade de ocorrer um escorregamento. Os dados de entrada, que são representados por pontos conhecidos que são justamente as amostras da população estudada, devem estar no formato raster, que por sua vez, são combinados espacialmente para que sejam estimados os valores desconhecidos. Inicialmente, é estabelecida uma probabilidade a priori dos valores dos pixels conhecidos, através de uma análise estatística condicional e os valores da probabilidade a posteriori por sua vez, são computados dentro do ambiente do SIG, como resposta à análise probabilística.

A probabilidade a priori para a ocorrência de um dado fenômeno pode ser estimada por modelos simples de distribuição espacial aleatória ou por análises estatísticas multivariadas. (Agterberg, 1989). Através da tabulação cruzada são obtidos os dados para a probabilidade a posteriori entre o plano de informação com as ocorrências (escorregamentos) mapeadas e os planos de informação das evidências. Para isso, os vários planos de informação utilizados na análise devem ser reclassificados e transformados em mapas binários, onde aparecem apenas as classes favorável e desfavorável. O limiar de corte pode ser obtido tanto através do julgamento subjetivo de especialistas, como por através de técnicas estatísticas que medem a correlação espacial, tal como o parâmetro de contraste (C_w).

A partir dos mapas binários gerados, foi realizada uma tabulação cruzada, das evidências com o plano de informação contendo as ocorrências (verdades de campo). Através desse procedimento é gerada uma matriz de dados onde cada pixel corresponde à interseção das classes de evidências com o plano de informação “evento”. Esses valores de correlação são utilizados para a obtenção dos valores de probabilidade a posteriori e nos mapas de incertezas do processo. A descrição da fundamentação dessa modelagem foi feita no capítulo 2.

3.5.6.1 Modelagem de dados – implementação da modelagem WOFE

A modelagem pesos de evidência “WOFE” foi implementada sobre mapas com padrões binários. O roteiro seguido para implementação prática, é descrito a seguir:

1. Seleção das evidências/condicionantes utilizados na modelagem;

A seleção dos temas que foram consideradas como evidências para o processo obedeceu a alguns critérios, quais sejam: Consulta bibliográfica com a finalidade de estabelecer quais temas influenciam o desencadeamento nesses movimentos com base na vasta experiência de pesquisadores em muitos trabalhos que já foram realizados tanto no Brasil como em outros locais, disponibilidade de dados. Dessa forma, foram considerados o mapa geológico, mapa geomorfológico, mapa de cobertura vegetal, mapa de declividade, mapa de exposição de vertentes, mapa hipsométrico, mapa de forma das vertentes e mapa de energia do relevo.

2. Estabelecimento dos parâmetros da análise

A definição dos parâmetros da análise obedeceu a uma seqüência, mostrada a seguir:

- Definição do arquivo .grd que representa a área de estudo;
- Definição do arquivo .shp, que representa os pontos de treinamento, que correspondem às cicatrizes de escorregamento conhecidas;
- Definição do total de pontos de treinamento. Pode-se utilizar todos os pontos que compõem o arquivo, bem como selecionar uma parte deles, de forma tanto orientada quanto aleatória .
- Definição das unidades de área, que correspondem à resolução ou medida da área em Km, ocupada pelo ponto que representa o evento, no caso a área considerada como sendo de um escorregamento .

Os parâmetros gerais utilizados na execução da modelagem “pesos das evidências” estão sintetizados e podem ser vistos na Tabela 3.2

Tabela 3.2 - Parâmetros usados na modelagem pesos das evidências.

Nome do tema usado como treinamento:	Cicatrizes.shp
Número total de pontos de treinamento:	133
Tema representando a área de estudo:	Mapa base
Área da célula unitária:	0,01 km ²
Código da classe dados ausentes:	- 99
Probabilidade prévia (baseada no número de ocorrências)	0.0184
Desvio padrão da probabilidade prévia:	0.0016
Área total modelada:	72.1052 Km ²

3. Cálculo estatístico da medida da associação espacial entre as classes dos diversos mapas, considerados como condicionantes dos eventos, no caso dos escorregamentos, e posteriormente efetuar a conversão dessas medidas em pesos;

O objetivo dessa etapa é 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-Wofe, pois trata-se de uma extensão desenvolvida em linguagem Avenue para o Arc View GIS pelo Geological Survey of Canada e US Geological Survey. Esta extensão foi programada a partir das rotinas desenvolvidas originalmente em FORTRAN e em linguagem de modelagem por Bonham-Carter e seus colaboradores (Bonham-Carter, 1994; Bonham-Carter *et al.*, 1998). Essa rotina permite a seleção dos mapas de evidências/condicionantes a serem modelados e conduz todo o cálculo dos ponderadores e a posterior composição dos mapas de suscetibilidade, usando o conceito de “condições únicas”, e dispensando as etapas de conversão e exportação/importação de arquivos para serem processados externamente ao software de SIG. (Franca-Rocha, 2001)

Essa extensão já vem sendo testada desde 1997 por pesquisadores canadenses e americanos e por técnicos de empresas de exploração mineral, apresentando um bom grau de confiabilidade para esse tipo de abordagem o que também foi comprovado em Franca-Rocha (2002), contudo não se tem muitos trabalhos que comprovem o seu potencial de aplicação em outras áreas da Geologia.

4. Análise da distribuição dos pesos de evidência em cada mapa e seleção dos limites, para uma posterior reclassificação desses mapas como binários.

A modelagem “pesos das evidências” pode ser executada tanto em mapas com classes múltiplas, quanto em mapas binários, mas segundo Bonham-Carter, (1994), Wright & Bonham-Carter, (1996) para a análise sobre mapas com múltiplas classes as estimativas tornam-se instáveis e suas variâncias apresentam-se elevadas, de forma que a melhor solução para esse problema é transformar os mapas multi-classes em mapas binários onde a evidência está presente ou ausente.

Ainda segundo esses autores, a utilização de mapas binários na modelagem, além de conferir maior robustez estatística às estimativas, torna mais fácil a interpretação dos resultados. O limite para reclassificação, tanto pode ser escolhido com base no julgamento de especialistas quanto estatisticamente, utilizando-se para isso uma medida estatística.

5. Verificação e avaliação da independência condicional entre os mapas de evidência

A modelagem WOFE pressupõe que exista independência condicional entre os dados, contudo é muito difícil na prática conseguir um ajuste que implique na independência total, de forma que é necessário a aplicação de testes estatísticos para verificar em que grau ocorreu a violação desse pressuposto importante. Para isso, foram utilizados os testes pareado e global para a avaliação do grau de violação da independência condicional envolvendo os mapas modelados. Dependendo do resultado dessa análise, devem ser efetuados os devidos ajustes, combinando ou eliminando mapas, para que esse pressuposto importante do método seja respeitado;

6. Integração entre os mapas de evidências binários reclassificados e ponderados.

A partir dos mapas binários gerados, foi realizada uma tabulação cruzada das evidências, com o plano de informação contendo as ocorrências (verdades de campo). Através desse procedimento, é gerada uma matriz de dados onde cada pixel corresponde à interseção das classes de evidências com o plano de informação “evento”. Esses valores de correlação são utilizados para a obtenção dos valores de probabilidade a posteriori. Esse procedimento foi repetido para duas situações: A primeira utilizando a carta de energia do relevo, resultante da combinação das cartas de dissecação horizontal, dissecação vertical e mapa de declividade e a segunda utilizando apenas o mapa de declividade. Esta duplicação teve como objetivo possibilitar a avaliação de possíveis diferenças na análise, em decorrência da inserção de um ou outro produto na modelagem.

7. Avaliação das Tabelas de variâncias, para produzir os mapas das incertezas da modelagem

Foi realizada para a avaliação das incertezas inerentes à modelagem, que normalmente estão associadas ao processo de cálculo de pesos de evidência, bem como devido à ausência de dados em algum local, quando isso ocorre.

3.5.7 Elaboração de mapas temáticos

Alguns mapas utilizados na análise foram compilados e transformados em arquivos digitais, conforme descrição feita no item 3.4. Outros, no entanto, foram gerados a partir de dados de fontes primárias. A descrição desses produtos é apresentada a seguir.

3.5.7.1 Mapa de áreas com escorregamentos

O mapa com as áreas onde ocorreram escorregamentos foi obtido através da identificação de cicatrizes de escorregamentos em fotografias aéreas na escala 1:10.000, de cadastramento feito em trabalhos de campo, e também dados disponíveis em registros do banco de dados do Plano Preventivo de Defesa Civil (PPDC), do Instituto Geológico, bem como nos registros da defesa civil municipal entre os anos de 1988 a 2001 (Figura 3.2).

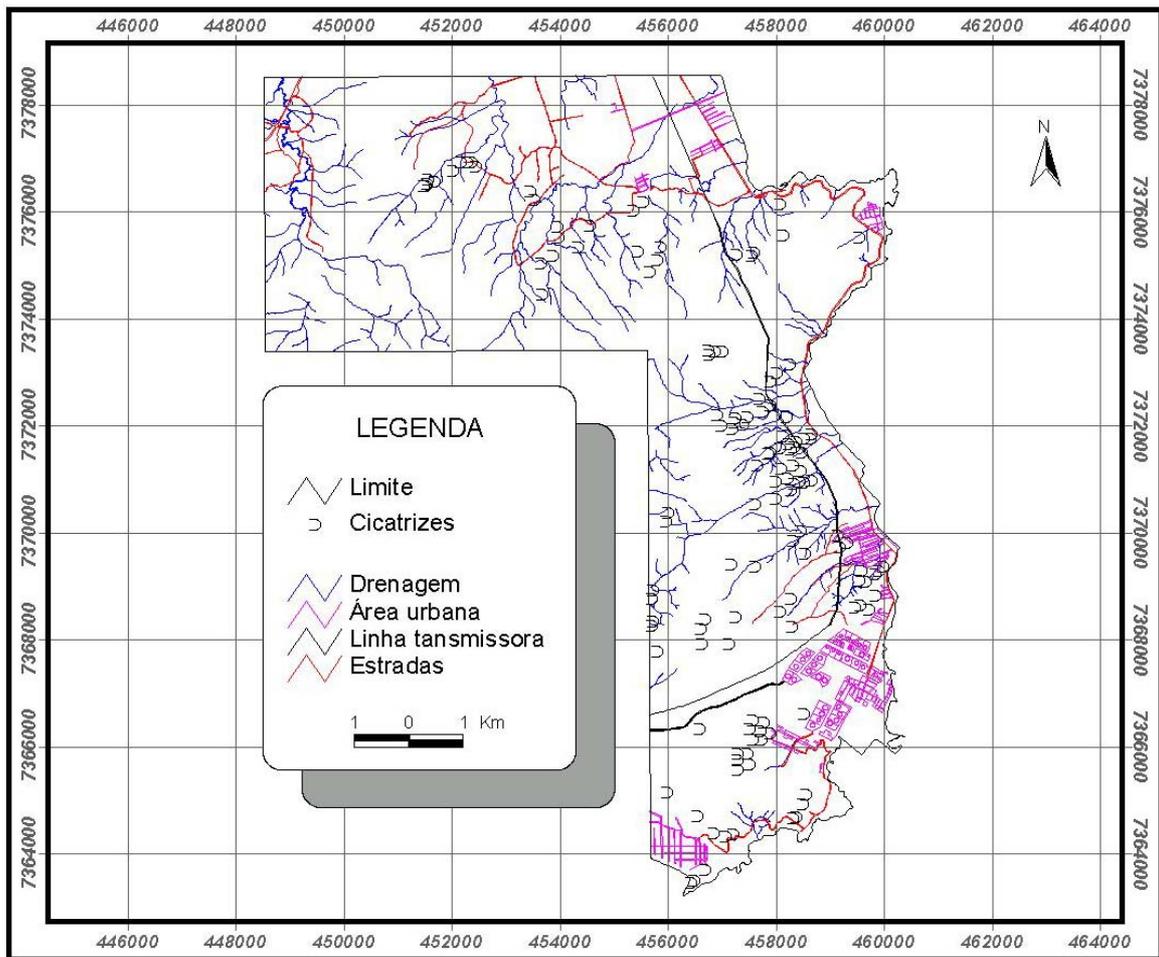


Figura 3.2 – Mapa de escorregamentos da área de estudo

Os principais processos identificados são: Escorregamento translacional de solo e em depósitos de tálus e colúvio, rolamentos de blocos rochosos e matacões, quedas, deslocamentos. Em determinados locais ocorre um ou outro tipo, em outros no entanto, ocorre uma combinação de dois ou mais tipos. Os processos considerados aqui são os escorregamentos translacionais de solos e as quedas de detritos.

3.5.7.2 Elaboração de mapas derivados da altimetria

Os dados provenientes das cartas topográficas serviram como fonte para a elaboração de diversos produtos derivados, utilizados no presente trabalho como evidências do processo, e a obtenção desses produtos seguiu o seguinte roteiro:

3.5.7.2.1 Modelo numérico do terreno

Felgueiras (2001) define um **Modelo Numérico de Terreno** (MNT) como sendo uma representação matemática computacional da distribuição de um fenômeno espacial que ocorre dentro de uma região da superfície terrestre. Esse autor cita relevo, informações geológicas, levantamentos de profundidades do mar ou de um rio, informações meteorológicas e dados geofísicos e geoquímicos, como exemplos típicos de fenômenos que podem ser representados por um Modelo Numérico de Terreno.

A representação de uma superfície real no computador requer a elaboração e criação de um modelo digital, através de uma rede (grade) de pontos, de forma que o usuário possa ter acesso às características espaciais do terreno. Esse autor destaca a importância da criação do MNT como uma nova maneira de focar o problema da elaboração e implantação de projetos, já que a partir desses modelos, pode-se proceder a cálculos diretos de volumes, áreas, desenhar perfis e seções transversais, gerar imagens sombreadas ou em níveis de cinza, gerar mapas de declividade e exposição de vertentes, gerar fatiamentos em intervalos desejados e representações de fenômenos espaciais em três dimensões.

Burrough (1986) destaca os seguintes usos para o Modelo Numérico de Terreno:

- Armazenamento de dados de altimetria, com objetivo de gerar mapas topográficos;
- Análises de corte – aterro, utilizados em Geologia de Engenharia, mais especificamente para projetos de estradas e barragens;
- Elaboração de mapas de declividade e exposição de vertentes para subsidiar análises geomorfológicas;
- Análise de variáveis geofísicas e geoquímicas;
- Apresentação de dados tridimensionalmente, em combinação com outras variáveis.

Dados digitais de elevação podem ser armazenados em pontos de elevação tanto em grid regular, em uma rede de triângulos integrada, mais conhecida como TIN (*Triangular Irregular Network*) ou como contornos vetorizados armazenados em

um gráfico digital de linha, cada um desses formatos oferecendo vantagens para certas aplicações.

O tipo de aplicação, definido como procedimentos de análise executados sobre os modelos digitais, tanto podem ser qualitativos como quantitativos. Nesse trabalho, serão utilizadas aplicações quantitativas, como a geração de mapa de declividades e exposição de vertentes.

Com relação à resolução, diversos estudos exploram o efeito do tamanho do grid em representações da superfície na escala da paisagem (Hutchinson & Bowling, 1991). Esses estudos mostram que distribuições derivadas de um MNT dependem muito do tamanho do grid. Zhang & Montgomery (1994) analisaram sistematicamente o efeito do tamanho do grid nas representações de parâmetros topográficos e concluíram que uma resolução de 10m é aceitável para modelagem e simulação de processos geomórficos, na escala 1:10000, uma vez que existe uma estreita relação entre a resolução e o volume de dados que se deseja representar. Logicamente a escala original dos mapas primários, também é extremamente importante na definição da escala de representação de dados topográficos.

Seguindo as etapas descritas em Felgueiras (2001), o processo de geração do modelo numérico do terreno (MNT) foi dividido em três etapas: aquisição das amostras ou amostragem, modelagem ou geração do modelo e finalmente o tipo de aplicação.

A amostragem compreende a aquisição de um conjunto de amostras representativas do fenômeno que está sendo estudado. No caso, as amostras em questão são as curvas de nível representadas por linhas de isovalores em relação à altitude. A geração do modelo envolve a criação de estruturas de dados e a definição de superfícies de ajuste, uma vez que o fenômeno é representado por uma superfície contínua, obtida a partir das amostras (isolinhas). Essas estruturas são definidas de forma a possibilitar uma manipulação conveniente e eficiente dos modelos pelos algoritmos de análise contidos no SIG. A sua elaboração compreende as seguintes etapas:

1. Entrada de dados para construção do MNT

A amostragem compreende a aquisição de um conjunto de amostras que representam a variação de um fenômeno espacial de interesse. Assim, uma

amostragem deve obedecer determinados critérios que satisfaçam às necessidades do tipo de modelagem que se pretende, assim, sendo representativa do comportamento do fenômeno estudado. Ela não pode ser insuficiente (subamostragem), nem ser redundante (superamostragem). A subamostragem, por insuficiência de informações conduz à geração de modelos pobres. A superamostragem, por excesso de informação, pode sobrecarregar o sistema com o uso excessivo de memória e assim prejudicar os resultados da modelagem. Na definição de uma amostragem representativa, deve ser considerado a quantidade e também o posicionamento das amostras em relação ao comportamento do fenômeno a ser modelado. Citando o exemplo da altimetria, que é o fenômeno modelado nesse trabalho, Felgueiras (2001), argumenta que uma superamostragem numa região plana significa redundância de informação, enquanto que subamostragem em regiões de relevo íngreme pode levar a resultados insatisfatórios, já que a modelagem não é capaz de corrigir problemas com amostragens.

Os dados utilizados nesse trabalho, para a geração do modelo numérico do terreno, estão representados por curvas de nível, que são a representação de uma superfície através de isolinhas contidas nos mapas topográficos, com coordenadas XYZ, onde Z caracteriza o parâmetro a ser modelado, no caso a altitude, sendo $Z=f(X, Y)$.

A entrada desses dados foi feita manualmente, via mesa digitalizadora, que consiste num processo de vetorização seguindo as linhas, que posteriormente serão transformadas em seqüência de pontos, com coordenadas XY de mesmo valor em Z para cada isolinha. Os valores de Z são atribuídos dentro do mesmo sistema onde foi feita a vetorização (CAD). Uma vez que os escorregamentos são processos pontuais e a área utilizada para o teste apresenta um relevo bastante íngreme, necessitando de amostragem mais criteriosa, foram utilizados mapas topográficos na escala 1:10.000 e com equidistância das curvas 5 metros. Com isso, acredita-se que tenha sido obtido um modelo com uma resolução adequada, sem que isso comprometa a capacidade do sistema e do equipamento utilizados.

2. Modelagem do MNT

Nesse trabalho, foi feita referência apenas ao modelo irregular de triângulos (TIN), por ser este o adotado. Uma grade irregular de triângulos é um poliedro de faces triangulares, onde os pontos amostras são conectados por linhas para formar triângulos. Assim, os valores de cota dos vértices dos elementos triangulares da malha triangular não precisam ser estimados por interpolações.

A geração do modelo adotado compreende a construção de uma malha triangular irregular e a definição de funções interpolantes. As funções de interpolação são definidas para cada triângulo da malha, em um processo conhecido como ajuste de superfície. Assim, cada função de ajuste, geralmente um polinômio, é definida utilizando-se os vértices dos triângulos e em muitos casos também os vértices dos triângulos vizinhos.

3. Elaboração de produtos derivados do MNT: Declividade, Exposição de vertentes e mapa hipsométrico

A declividade em uma posição da superfície é definida por um plano tangente àquela posição da superfície modelada pelo MNT. A declividade é composta por duas componentes: o **gradiente**, que é a declividade propriamente dita, também chamado de máxima razão de variação de cota Z e; a **exposição** que é a direção dessa máxima razão de variação de cota. Neste trabalho, serão utilizados os termos declividade e exposição de vertentes para essas componentes. A declividade pode ser expressa em graus (0 a 90^0) ou valores percentuais, enquanto que a exposição é expressa em graus (0 a 360^0), com relação ao norte. As formulações gerais para o cálculo da **declividade D** e **exposição E** são dadas a seguir.

$$D = \arctg \left\{ \left[(\delta Z / \delta X)^2 + (\delta Z / \delta Y)^2 \right]^{1/2} \right\} \quad \text{Equação 3.1}$$

$$E = \arctg \left[- \left[(\delta Z / \delta Y) / (\delta Z / \delta X) \right] \right] \quad \left(- \Pi < E < \Pi \right) \quad \text{Equação 3.2}$$

Onde as derivadas parciais nas direções X e Y, $\delta Z / \delta X$ e $\delta Z / \delta Y$, são as componentes do vetor gradiente em uma determinada posição.

Segundo Burrough (1986), para uma superfície representada por um modelo de grade triangular, deve-se calcular as componentes $\delta Z / \delta X$ e $\delta Z / \delta Y$, a partir da superfície de ajuste utilizada para representar o comportamento do fenômeno dentro do triângulo que contém o ponto definido na posição i,j. Por exemplo, utilizando-se um ajuste linear para cada triângulo pode-se facilmente obter as derivadas parciais, diretamente da equação do plano que passa pelos vértices do triângulo.

De uma maneira mais simples, a função declividade calcula a máxima razão (taxa) de mudança entre cada célula e as células vizinhas ou a máxima mudança na elevação sobre distância entre a célula e suas oito vizinhas. Toda célula no mapa raster de saída tem um valor de declividade. Os menores valores naturalmente correspondem aos locais mais planos, enquanto os maiores às regiões mais íngremes do terreno. Os valores tanto podem ser expressos em graus quanto em valores percentuais.

Exposição de vertentes é uma medida, no sentido horário, em graus variando de 0° a 360° a partir do norte. O valor de para cada célula em um grupo de dados indica a direção das faces com maior declividade, de modo que regiões perfeitamente planas, onde a declividade é igual a zero, o valor da exposição é igual a -1 no sistema utilizado.

Com relação à construção, dentre os métodos mais tradicionais de construção das cartas de declividade, destacam-se as propostas por Wentwort (1930) e De Biasi (1970).

Aguiar & Krelling (1984) sugerem uma avaliação visual qualitativa do espaçamento planimétrico entre curvas de nível, em uma carta topográfica, para a elaboração de mapas de declividade, pois a precisão da representação numérica da declividade depende da fidelidade da carta utilizada. Cartas em grande escala (1:10.000, 1:5.000) apresentam menores equidistâncias entre curvas e, portanto, menores distorções da realidade, enquanto cartas de pequena escala em regiões acidentadas, produziriam cartas de declividade menos precisas, de modo que deve-se levar em conta sempre a destinação desse produto e as limitações da carta topográfica.

Para este trabalho, adotou-se a técnica de construção da carta em meio automatizado, mais especificamente em Sistema de Informação Geográfica. Mesmo sabendo que existem limitações, pode-se considerar que essa técnica representa

um ganho em termos de tempo, já que o método de construção tradicional através de ábacos, é moroso e cansativo. De Biasi *et al.* (1977) atribuíram aos avanços da computação eletrônica, o fato de muitos índices morfométricos não terem caído em desuso, devido às facilidades oferecidas para os cálculos matemáticos nos computadores.

Segundo Guerra (1998), o cálculo automatizado considera a área como uma matriz bidirecional e a determinação da declividade de cada uma célula (pixel) é função da distribuição das curvas de nível. A grande vantagem é a rapidez com que ela é feita, e a principal desvantagem decorre do fato de que as células são geralmente pequenas, o que torna difícil à leitura do produto resultante.

A obtenção desses produtos de maneira automatizada é feita com a utilização de sistemas que convertem um arquivo de pontos em uma superfície representativa de um atributo selecionado, no caso elevação. O método usado utiliza uma rede irregular de triangulação para representar os pontos como uma superfície contínua. Quando o método é aplicado, os pontos são unidos em uma rede de triângulos com cada ponto representando um vértice do triângulo. Cada vértice por sua vez, é representado pelos valores de X, Y e Z, onde X e Y representam valores locais bidimensionais dos pontos e Z é o atributo elevação.

Com relação à definição dos intervalos de classes, adotou-se a classificação nos seguintes intervalos: 0 a 10°, 10 –a 20° , 20 a 30° , 30 a 45° e >45° , pois considerou-se que esses limites sejam suficientes abranger toda diversidade de feições geomorfológicas existentes na área de estudo.

O mapa hipsométrico foi obtido por uma reclassificação do Modelo Numérico de Terreno em intervalos de altitude pré-definidos. Os intervalos utilizados foram: 0 – 100m; 100 – 200m; 200 – 400m; 400 – 600m; 600 – 800m e > 100m.

3.5.7.3 Carta de energia do relevo

A carta de energia do relevo representa uma síntese das cartas de declividade, dissecação horizontal e dissecação vertical do relevo. Esta carta foi obtida a partir da criação dessas três cartas acima citadas em ambiente semi automatizado através de operações matemáticas de multiplicação. A obtenção das três cartas que serviram de base para esta, seguiu o roteiro descrito a seguir.

1. Carta de dissecação horizontal

Construída para medir a distância que separa os fundos de vales dos interflúvios. A obtenção desse produto foi baseada em uma técnica desenvolvida por Spiridinov (1981) adaptada por Mauro *et. al* (1991). O primeiro passo para a construção dessa carta foi o traçado das linhas de interflúvios ou linhas de cumeadas que separam as sub-bacias hidrográficas, tendo como critério, partir das maiores para as menores extensões. A delimitação desses limites é importante porque além de estabelecer áreas fornecedoras de água do escoamento pluvial, fornece também as direções em que ocorre esse escoamento.

Segundo Cunha (1999), esse documento cartográfico permite avaliar o trabalho de dissecação elaborado pelos rios sobre a superfície de interesse. Assim, esse documento pode ser utilizado para auxiliar na avaliação da fragilidade do terreno com relação à atuação dos processos morfogenéticos, já que interflúvios mais estreitos implicam em maior intensidade de atuação desses processos.

A carta de dissecação horizontal foi obtida seguindo roteiro descrito em Zacharias (2001), a qual utiliza a proposta de classificação de Spiridinov (1981) adaptada por Mauro *et.al* (1991), elaborada manualmente através das técnicas da cartografia tradicional. Essa carta foi obtida de maneira semi-automática, utilizando-se para isso o software AutoCad Map 2000. A elaboração desse produto, segue algumas etapas, a saber:

Criação de topologias de rede

A topologia de rede é criada com o objetivo de se estabelecer as relações espaciais entre as entidades devidamente geo-referenciadas, que compõem uma determinada base de dados, no caso específico entre os elementos da base cartográfica, obtida através da digitalização das cartas topográficas.

As entidades espaciais utilizadas na carta de dissecação horizontal do relevo foram a drenagem e os divisores de água, já que a dissecação horizontal mede justamente a distância entre essas duas entidades espaciais representadas por arquivos vetoriais. O primeiro passo foi a criação de topologias individuais para essas entidades, em seguida criou-se uma topologia combinada, ou seja, divisores e drenagem para produzir uma terceira, que por sua vez é utilizada para a análise de

distância. Esta análise de distância é feita através da criação de faixas de distâncias pré-determinadas denominada “*buffer*”.

A faixa de *buffer*, por sua vez, é desenhada automaticamente ao redor de uma determinada entidade espacial, no caso, a topologia agrupada criada da drenagem com os divisores de água. Essa distância logicamente pode ser escolhida em função do julgamento do especialista ou da necessidade. A geração dessa zona de *buffer* automaticamente gera vértices que sempre deixa distância entre o talvegue e a linha de cumeada e é através desse vértice que se identifica a distância horizontal entre essas duas linhas (Figura 3.3)

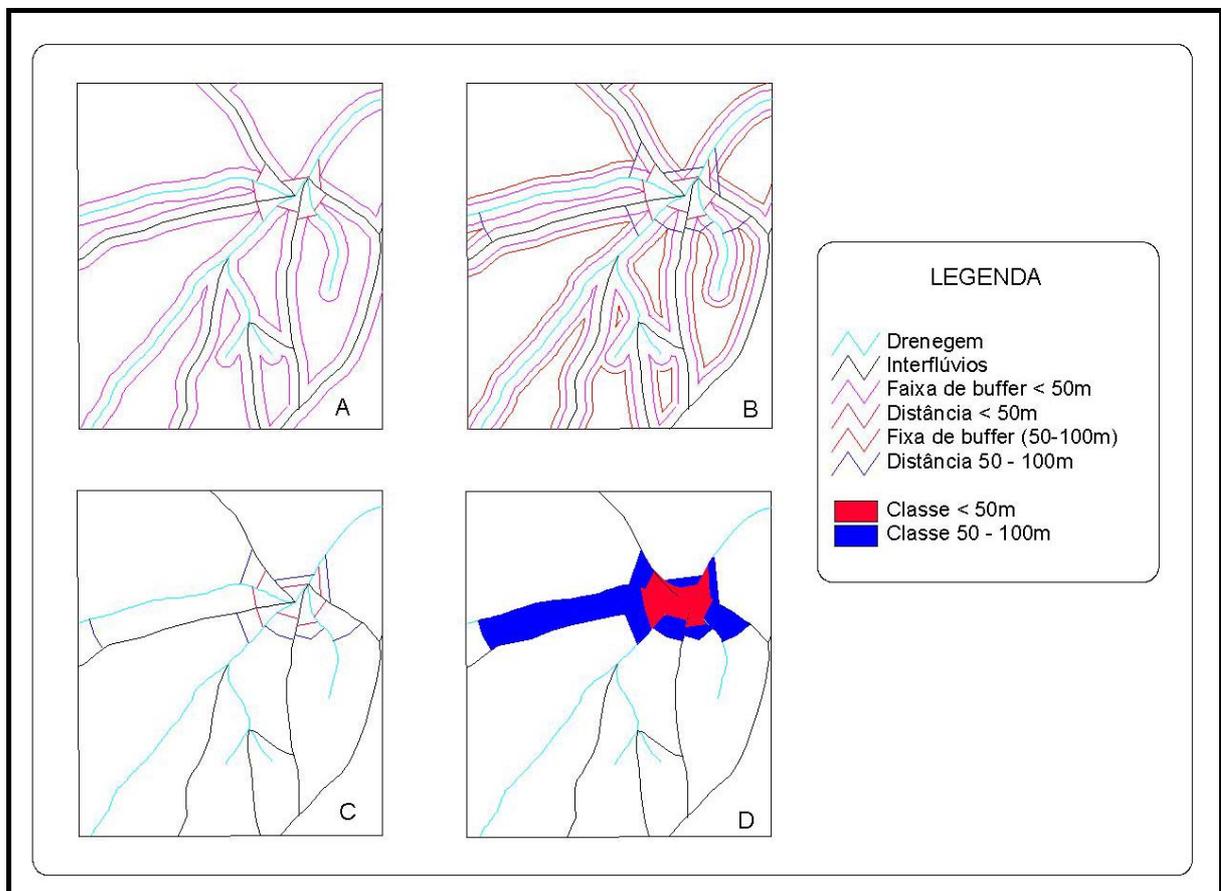


Figura 3.3 – Etapas de construção da carta de dissecação horizontal do relevo em ambiente semi-automatizado

É importante observar que uma vez que a criação da zona de *buffer* ocorre entre duas topologias agrupadas, deve-se sempre introduzir um valor igual à metade da distância pretendida, assim para obter-se a classe 50m por exemplo, deve-se introduzir um valor de 25m, uma vez que ao analisar as distâncias entre as divisores

e a linha de talvegue a faixa analisada para cada uma dessas duas entidades somadas daria um valor de 50m.

Assim, as áreas de fundo de vale e de cumeadas foram classificadas em seis classes pré-definidas de acordo com a sua distância, como mostra a Tabela 3.3. A quantificação das distâncias foi obtida a partir dos vértices de distância dos *buffers*.

Tabela 3.3 - Classes de dissecação horizontal do relevo obtidas de maneira semi-automática através de *buffers*

CLASSES DE DISSECAÇÃO HORIZONTAL (m)	DISTÂNCIA DA ZONA DE BUFFER (m)
< 50	25
50 a 100	50
100 a 200	100
200 a 400	200
400 a 800	400
> 800	801

Criação de polígonos

Posteriormente a delimitação das zonas de *buffers* foi necessário a associação de valores de atributos às classes, bem como a rasterização dos mapas para análise, o que se faz através da criação de polígonos, seguida de rasterização, já que todas as análises posteriores foram feitas em arquivos do tipo raster (Figura 3.4)

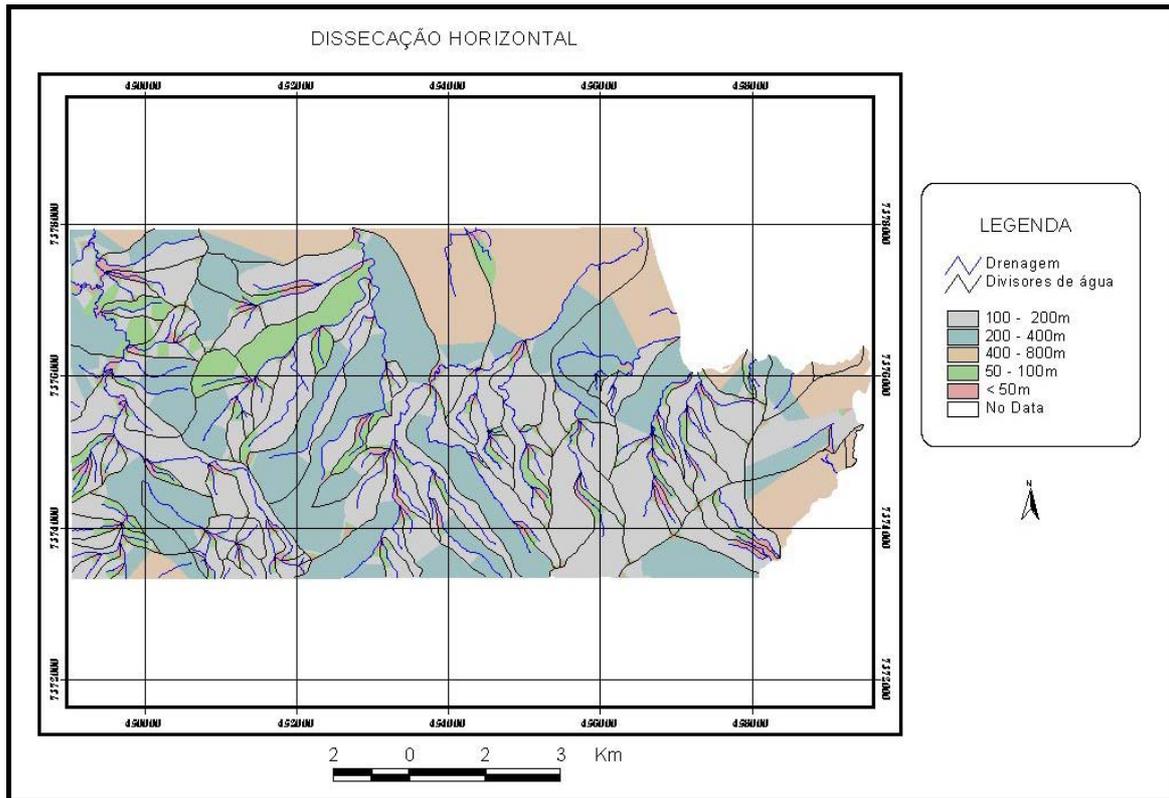


Figura 3.4 - Trecho da carta de dissecação horizontal do relevo, obtida de forma semi-automática.

2. Carta de dissecação vertical

A carta de dissecação vertical indica o desnível altimétrico entre os topos dos interflúvios ou linhas de cumeada e os fundos de vales, mostrando assim o entalhe vertical do canal fluvial. Assim, é possível analisar o grau de entalhamento realizado pelos rios e, principalmente, identificar e comparar os diferentes estágios desse entalhamento na área estudada. Essa comparação auxilia a avaliação da velocidade do fluxo do escoamento superficial, já que a velocidade do fluxo é diretamente proporcional ao desnível altimétrico, em função da força exercida pela gravidade.

Como no caso da dissecação horizontal adotou-se a proposta de Spiridinov (1981), para gerar as classes de dissecação vertical de forma semi-automática. Para isso seguiram-se as seguintes etapas:

Criação de topologias a partir da base cartográfica

Nessa etapa, foram criadas topologias de rede individuais para a drenagem, divisores de água e também a altimetria representada pelas curvas de nível. Com

essas topologias ativas, identificaram-se os pontos de intersecção entre rios e curvas de nível, em seguida esses pontos foram unidos as linhas de cumeada através de uma reta perpendicular ao divisor de água de modo a respeitar a linha de maior queda do relevo, representada pelo pela menor distância entre o talvegue e a linha de cumeada. Esse procedimento foi possível porque existem comandos dentro do software utilizado que permitem o cálculo dessas retas perpendiculares de maneira semi-automática. (Figura 3.5)

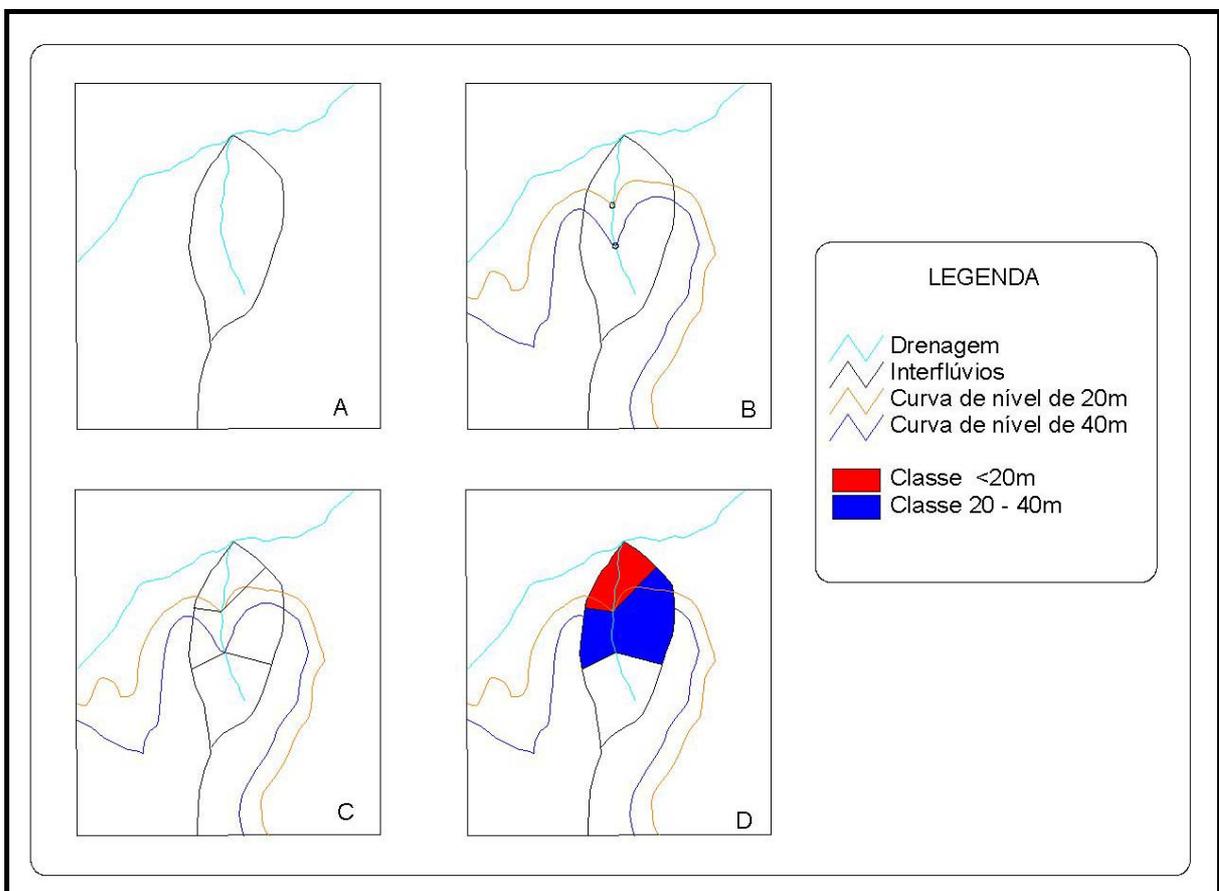


Figura 3.5 – Etapas de construção da carta de dissecação horizontal do relevo em ambiente semi-automatizado.

Criação de polígonos

Feito isso, de maneira idêntica àquela utilizada na carta de dissecação horizontal, foi necessário a criação de polígonos representativos das classes de dissecação vertical de acordo com a classificação de Spíridinov (1981), sendo os valores dessas classes representativos do desnível altimétrico. Dessa forma, os

valores altimétricos são medidos no mapa em relação ao talvegue, assim o setor do mapa entre o rio e a primeira curva de nível representa área com desnível menor que 20m. A área entre esta curva e a segunda representa desnível de 40m, entre esta e a terceira, desnível de 60m e assim sucessivamente, isso obviamente considerando uma eqüidistância de 20m entre as curvas de nível. Um trecho dessa carta pode ser visto na figura 3.6

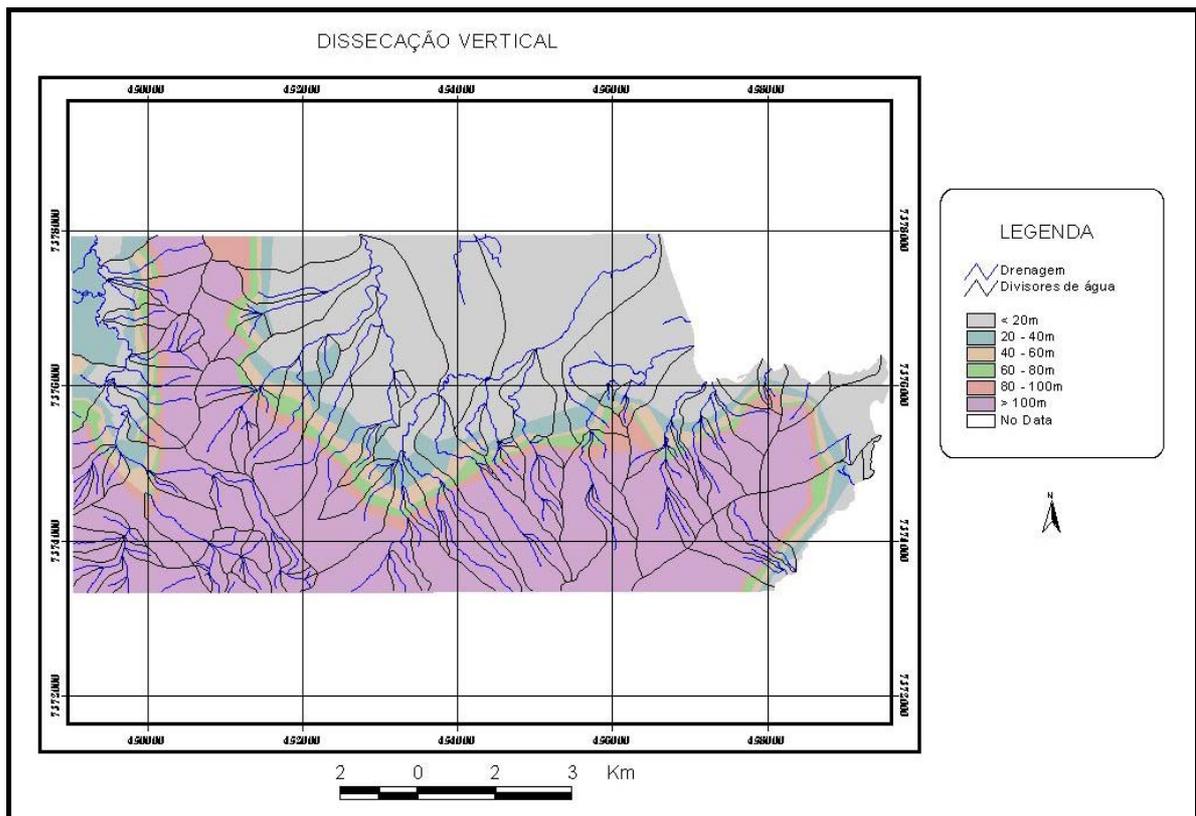


Figura 3.6 - Trecho da carta de dissecação vertical do relevo, obtida de forma semi-automática

Elaboração da carta de energia do relevo

De acordo com a proposta de Mendes (1993), a carta de energia do relevo foi obtida pela integração das três cartas morfométricas (dissecação horizontal, dissecação vertical e declividade). Este produto apresenta seis classes morfométricas que variam de muito forte a muito fraca, seguindo uma série de combinações que definem os critérios para o estabelecimento das classes de energia do relevo, como mostra a Tabela 3.4. O resultado desse processo é mostrado no capítulo 5.

Tabela 3.4 - Critérios morfométricos para o estabelecimento de classes de energia do relevo. Mendes (1993)

CLASSES DE ENERGIA DO RELEVO	NÚMERO DE IDENTIFICAÇÃO DAS CLASSES		
	DECLIVIDADE	DISSECAÇÃO HORIZONTAL	DISSECAÇÃO VERTICAL
Muito Forte (Classe 1)	6	1 ——— 6	1 ——— 6
	1 ——— 6	6	1 ——— 6
Forte (Classe 2)	5	1 ——— 5	1 ——— 6
	1 ——— 5	5	1 ——— 6
Medianamente Forte (Classe 3)	1 ——— 4	1 ——— 4	6
	3 e 4	3 e 4	5
Média (Classe 4)	1 e 2	1 e 2	5
	2 ——— 4	1 ——— 4	4
	1	2 ——— 4	4
	4	1 ——— 4	1 ——— 4
	1 ——— 2	4	1 ——— 4
Fraca (Classe 5)	1	1	4
	1 ——— 3	1 ——— 3	3
	2 e 3	1 ——— 3	2
	1	2	2
	1 ——— 3	3	1
	3	1 ——— 2	1
Muito fraca (Classe 6)	1	1	2
	2 e 3	1 e 2	1

Dessa forma, realizou-se um processo de uniformização com relação ao número de classes nos três mapas gerados, de forma que cada um deles fosse representado com 6 classes. Em seguida, efetuou-se o cruzamento entre estes mapas. O cruzamento dos mapas de dissecação horizontal e vertical gerou 36 novas classes e o cruzamento desse mapa resultante com o de declividade gerou 216 novas classes, que posteriormente foram reclassificadas para atender aos critérios

estabelecidos na Tabela 3.4. O resultado dessa operação de reclassificação é mostrado na Tabela 3.5, a seguir:

Tabela 3.5 - Intervalos de reclassificação para geração da carta de energia do relevo.

Classe	A partir de	A menos de
1	2	3
	7	8
	41	42
	70	72
	75	78
2	3	5
	8	10
	13	16
	36	38
	42	44
	47	50
	78	80
3	81	84
	5	6
	10	12
	16	18
	19	31
	38	40
	44	46
	50	52
	53	58
	72	74
	84	85
	87	91
	103	106
108	112	
114	118	
120	124	
4	6	7
	12	13
	18	19
	31	36
	40	41
	46	47
	52	53
	58	65
	74	75
	80	81
	85	87
	91	99
	106	108
	112	114
118	120	
124	126	
5	25	31
	65	70
	126	164
6	99	102
	164	216

3.5.7.4 Mapa de forma das vertentes

Com o objetivo de estabelecer correlações entre os eventos e as formas das vertentes, foi elaborada um mapa temático de forma das vertentes a partir da configuração das curvas de nível observada nos mapas topográficos na escala 1:10.000, considerando-se as seguintes classes e critérios:

- 1) vertente côncava - áreas de configuração côncava das curvas de nível;
- 2) vertente convexa - áreas de configuração convexa das curvas de nível;
- 3) vertente retilínea - áreas de configuração retilínea das curvas de nível;
- 4) áreas planas, representadas por planície costeira, planícies fluviais, vales, etc.

3.5.7.5 Elaboração dos mapas das áreas de expansão urbana.

Foram elaborados os mapas de Uso Urbano dos anos de 1977, 1988 e 2000, com o objetivo de possibilitar a análise da evolução da ocupação urbana no período de 1977 a 2000. Estes mapas foram gerados através da extração do contorno da área com ocupação consolidada da área de estudo, por meio da interpretação visual tanto do produto analógico, no caso das fotos aéreas (1977), como das imagens digitais de 1988 e 2000, processadas de forma a realçar as feições urbanas, favorecendo o traço dos seus limites. Nas imagens digitais, foram realizadas operações de ampliação de contraste, de restauração, criadas composições coloridas e aplicada a técnica IHS, de forma a favorecer a delimitação da área urbana

A) Ampliação de contraste

A ampliação de contraste é uma técnica de realce que consiste na expansão do intervalo original de informação para toda escala de 256 níveis de cinza, através da utilização de uma função matemática. Essa técnica é normalmente utilizada em uma fase de pré-processamento com o objetivo de melhorar a qualidade das imagens para facilitar o reconhecimento de padrões pelo olho humano.

A ampliação do contraste consiste numa transferência radiométrica em cada "pixel", com o objetivo de aumentar a discriminação visual entre os objetos presentes

na imagem. Realiza-se a operação ponto a ponto, independentemente da vizinhança do pixel.

B) Composições coloridas

Segundo Crosta (1992) a composição colorida é a mais tradicional forma de combinação de 3 bandas espectrais de satélite. Para estudo de uso e ocupação é aceito como mais adequadas as composições com duas bandas no visível e uma no infra-vermelho, contudo isso pode ser modificado de acordo com as características da cena, bem como do tipo de informação que se deseja extrair desses produtos. . A razão para a utilização de uma composição colorida é o fato do olho humano ser mais eficiente para distinguir cores do que níveis de cinza.

C) Transformação IHS (Intensity-Hue-Saturation)

Para descrever as propriedades de cor de um objeto, em uma imagem, normalmente o olho humano não distingue a proporção de azul, verde e vermelho presentes, e sim, avalia a intensidade (I), a cor ou matiz (H) e a saturação (S).

A **intensidade** ou brilho é a medida de energia total envolvida em todos os comprimentos de onda, sendo portanto responsável pela sensação de brilho dessa energia incidente sobre o olho.

O **matiz** ou cor de um objeto é a medida do comprimento de onda médio da luz que se reflete ou se emite, definindo, portanto, a cor do objeto.

A **saturação** ou pureza expressa o intervalo de comprimento de onda ao redor do comprimento de onda médio, no qual a energia é refletida ou transmitida. Um alto valor de saturação resulta em uma cor espectralmente pura, ao passo que um baixo valor indica uma mistura de comprimentos de onda que irá produzir tons pastéis (apagados).

Esta técnica consiste em uma transformação dos componentes vermelho, verde, azul (RGB) nos componentes intensidade, matiz e saturação (IHS), que pode ser utilizada para produzir composições coloridas com reduzida correlação interbanda, conseqüentemente com melhor utilização do espaço de cores, e combinar diferentes tipos de imagem ou imagens de diferentes sensores (Crósta, 1992).

No espaço IHS existem várias possibilidades de realces espectrais, espaciais e de integração de dados de fontes diversas antes do retorno para o espaço RGB.

Na transformação RGB para IHS, escolhem-se três bandas de uma imagem e associa-se cada banda a um dos componentes RGB. Dessa forma, cada pixel na imagem de saída terá um correspondente no espaço IHS. Como resultado, tem-se um conjunto de três novas imagens: Uma de intensidade(I), uma de matiz (H) e uma terceira de saturação (S).A componente I pode ser substituída por uma imagem de melhor resolução espacial, no caso foi substituída pela banda 8 do Landsat 7 ETM+, com 15 m de resolução espacial.As imagens que correspondem às componentes I, H e S podem ser realçadas, através de operações de ampliação de contraste, expandindo-se o intervalo de intensidade e saturação e, quando convertidas de IHS para RGB, permitem melhor separação das cores e das feições que se deseja observar.

Por serem independentes, estes três parâmetros podem ser analisados e modificados separadamente, para um melhor ajuste das cores às características do sistema visual.

Neste trabalho, com relação às fotos áreas, de 1977, foram extraídos os limites da área urbana consolidada através da interpretação visual realizada diretamente sobre o papel overlay, com o auxílio de um estereoscópio de espelho.

Com relação à imagem de 1988, foi inicialmente efetuada a ampliação linear de contraste, para favorecer a identificação das feições relacionadas ao alvo urbano e a posterior restauração, para se tentar melhorar a resolução espacial da imagem do Landsat TM5, que é de 30 m em todas as bandas, resolução considerada baixa para o estudo de áreas urbanas. Através do processo de restauração, obteve-se um produto com melhor resolução espacial, favorecendo a identificação dos limites da área urbana consolidada.

Após a restauração, foi efetuada a composição colorida com as bandas 5R4G3B, sobre a qual foram traçados os limites da área urbana consolidada diretamente sobre a tela do computador.

No caso da imagem de 2000, do Landsat 7 ETM+, foi realizada a fusão das bandas 3, 4,e 5 (5R4G3B) de resolução de 30m, com a banda pancromática, de resolução de 15m, através da técnica IHS, segundo procedimento descrito acima, gerando-se um produto de melhor resolução espacial, uma vez que a componente I foi substituída pela banda pancromática de resolução de 15 m, de forma a favorecer a extração dos limites da área urbana.

Os limites obtidos nas três datas foram confrontados, de forma a se estabelecer as direções de crescimento da cidade de São Sebastião.

Cabe salientar que não se buscou com esse trabalho produzir mapas de uso e ocupação detalhados, pois o objetivo foi mostrar apenas as áreas com ocupação urbana consolidada e avaliar em que direção está acontecendo o avanço dessa ocupação, para confrontar com áreas de maior suscetibilidade natural a escorregamentos, além das áreas com o processo já instalado.

4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

4.1 GEOLOGIA

O Município de São Sebastião situa-se sobre embasamento cristalino que se dispõe ao longo de toda faixa litorânea do Estado de São Paulo, formado por rochas gnáissico - migmatíticas e metassedimentos associados de idade pré - cambriana, 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. Ocorrem ainda diversos diques de caráter básico e intermediário e com afinidades alcalinas.

Na década de 70 vários trabalhos de caráter regional foram realizados no litoral paulista, como o mapeamento na escala 1:100. 000 de Rideg (1974) *apud* Hasui *et al* (1994), Melo e Pires Neto (1997) ao longo do litoral norte do estado e o projeto SUDELPA no litoral sul. Destaca-se ainda o projeto Santos – Iguape realizado pela CPRM em 1977.

Estudos temáticos foram feitos por Sadowski (1974) e Sadowski (1983) que desenvolveu estudos sobre a tectônica da Serra de Cubatão e os cinturões de cisalhamento continentais.

Vários autores desenvolveram trabalhos na área, entre eles Melo & Pires Neto (1977), Hasui et al. (1975), Hasui et al. (1978), Campanha & Ens (1993), Campanha *et al* (1994), (1995), Campanha & Ens (1996), IG (1996) e Maffra (2000). Os diques da região foram estudados por Garda & Schorscher (1994) e os depósitos cenozóicos do litoral paulista foram estudados, entre outros, por Suguio & Martin (1978), Souza (1990), Souza & Suguio (1995a e 1995b).

A seguir será apresentada uma descrição da geologia local , no tocante às litologias e às estruturas geológicas presentes, com base nos trabalhos acima citados.

4.1.1 Caracterização Litológica

As unidades litológicas presentes pertencem a dois domínios principais:
Embasamento cristalino e depósitos cenozóicos.

4.1.1.1 Embasamento cristalino

Engloba os corpos graníticos denominados Pico do Papagaio, Pico do Guaecá e a unidade de maior expressão dentro da área, que é o complexo gnáissico migmatítico, formado por uma associação de biotita gnaisse, de textura predominantemente nebulítica, schlieren e flebítica e migmatitos de textura estromatítica. Essas rochas estão associadas aos relevos acidentados da região. Ocorrem ainda enxames de diques básico e alcalino na parte oriental da área, provenientes de um magmatismo juro-cretácico relacionado à abertura do oceano atlântico de acordo com Garda & Schorscher (1994).

a) Granito Pico do Papagaio

O granito Pico do Papagaio é um monzogranito com textura porfirítica e uma foliação bem desenvolvida, resultado da deformação que varia bastante das bordas para o interior do plúton. Nas bordas, a textura é marcada pela milonitização enquanto no interior a textura é equigranular.

A mineralogia é formada por quartzo, microclínio, plagioclásio, biotita e hornblenda. A rocha apresenta características de um granito de cor clara, róseo quando rocha fresca, e branco-amarelado quando alterada, e com pequenos pontos de cor vermelho-escuro devido à presença de granada. Em geral sua textura é de média a grossa.

b) Complexo Gnaisse – Migmatítico

O complexo gnáissico migmatítico é a unidade de maior extensão da área. Grada desde biotita gnaisse com bandamento até um migmatito com textura estromatítica a nebulítica.

Mineralogicamente, são formados por quartzo, biotita, muscovita, microclínio, plagioclásio, sillimanita, granada e feldspato potássico. A foliação é caracterizada

pelo bandamento composicional e pela orientação preferencial da biotita, muscovita e menos freqüentemente pela sillimanita quando esta ocorre.

Trata-se de uma rocha mista, caracterizada pela alternância de níveis claros e escuros, devido à presença de minerais com essas tonalidades de cores. Quando há um predomínio de níveis escuros, a rocha presente é o Biotita Gnaiss, enquanto os minerais claros formam níveis com espessuras milimétricas, sendo muitas vezes difícil a separação entre os dois níveis. Em locais onde a separação entre os níveis torna-se bem nítida, com formação de bandas denotando diferentes composições minerais, fica bem caracterizada a presença de migmatito bandado, cuja principal característica é a foliação. Os materiais provenientes da desagregação das rochas desta unidade são argilas, em geral bem avermelhadas, com a presença de placas de mica, de cor escura, ou prateada.

Os migmatitos com textura estromatítica são rochas com estruturas variadas e textura grosseira, caracterizadas pela formação de bandas, com significativa espessura e de diferente composição. Nesta unidade, os migmatitos destacam-se pelo tamanho dos cristais que constituem a rocha, alguns chegando a atingir diâmetros de até 10 centímetros. A foliação é bastante irregular ou difusa com relação aos outros migmatitos, produzindo formas mais variadas. O material de desagregação é uma mistura de argila de uma tonalidade avermelhada mais clara e areia grossa, e a mica ocorre freqüentemente em cristais maiores.

c) Granito Guaecá

O granito Guaecá é um monzogranito a granodiorito composto por quartzo, plagioclásio, microclínio, biotita e, muscovita e granada. Em geral o tamanho dos cristais varia muito, formando uma massa de cristais menores na qual se destacam megacristais com diâmetros superiores a 4 cm de feldspato, formando uma textura porfírica. Nos limites desta unidade, os megacristais estão orientados e intensamente estirados pela deformação, resultando uma foliação bem marcante. Os materiais resultantes da desagregação são areias.

Maffra (2000) separou o granito Guaecá em duas fácies, uma leucocrática com granada e uma rica em biotita. A fácies leucocrática com granada corresponde a uma rocha com textura equigranular e grãos de forma subeuhedral a aneuhedral. A textura em geral é variada, em alguns locais a textura é grossa com mega cristais

de feldspato potássico identificados com microclínios com inclusões de plagioclásios e quartzo gerando textura poiquiloblástica. Na parte central a textura é equigranular e a foliação é mais bem desenvolvida, apesar de estar presente em todo corpo com intensidade variável.

A fácies biotita diferencia-se por apresentar um enriquecimento em biotita de 10 a 15% e contato transicional enquanto a composição é praticamente a mesma. Essa fácies ocorre cavalcando as Zonas gnáissicas – migmatíticas e nesse contato ocorre intenso processo de milonitização.

Maffra (2000) identificou ainda uma Zona milonítica na cidade de São Sebastião com augen gnáisses associados ao longo do contato com a fácies biotita do granito Guaecá e com a unidade gnáissico – migmatítica. A ocorrência desse augen gnáisse é interpretado como uma provável variação de textura da fácies biotita diante do aumento da foliação.

Com relação ao metamorfismo foi identificada uma paragênese mineral genérica que indica grau metamórfico da fácies anfíbolito para as rochas cristalinas da região.

d) Diques

Os diques de diabásio são afaníticos, possuem orientação geral N50E e textura fanerítica fina e mais raramente granulometria grosseira.

Os diques alcalinos (lamprófiros) também possuem orientação geral N50E e ocorrem na cidade de São Sebastião. Apresentam textura afanítica ou porfirítica, sendo que a porfirítica apresenta fenocristais centimétricos de olivina e piroxênio.

4.1.1.2 Sedimentos inconsolidados:

Incluem os diferentes tipos de sedimentos cenozóicos que formam as planícies litorâneas e base das encostas. São formados, por sedimentos marinhos pleistocênicos da Formação Cananéia, sedimentos marinhos holocênicos, sedimentos flúvio – lagunares holocênicos e sedimentos continentais aluvionares e os depósitos associados a encostas.

a) Depósitos fluviais atuais e pré-atuais

Os depósitos fluviais atuais e pré-atuais são representados por sedimentos inconsolidados e associados aos aluviões. Em geral, são níveis de cascalho e areia de granulometria variada. Em alguns locais encontram-se antigos terraços fluviais preservados, cortando os aluviões atuais e situados 3 ou 4m acima do nível de várzea atual.

b) Depósitos associados a encostas - Tálus e Colúvios

Os depósitos associados a encostas são os sedimentos depositados na base das escarpas ou na meia encosta, em áreas onde à montante a declividade é acentuada o suficiente para que ocorra transporte do material por ação da força de gravidade. Os depósitos de tálus são acumulações contendo blocos e matacões de rochas do embasamento cristalino, com dimensões que podem chegar a métricas com graus de arredondamento variados, envoltos por uma matriz argilosa a areno siltosa. Os colúvios são depósitos com uma menor variação textural, dispostos na forma de rampas com espessuras que variam, compostos por uma matriz areno-siltosa argilosa com fragmentos de rochas de dimensões centimétricas, provenientes da desagregação de rochas do embasamento cristalino.

c) Depósitos Litorâneos atuais

Os depósitos Litorâneos atuais constituem-se de areias de praia, distribuídos ao longo da linha de costa, inconsolidadas e com granulometria muito variada. Em alguns locais onde a faixa de praia é mais estreita a granulometria é formada por areias médias a grossas enquanto nas praias mais amplas a granulometria é representada por areias mais finas e melhor selecionadas. Áreas com predomínio de areia muito fina têm uma distribuição espacial mais restrita e sua ocorrência é atribuída principalmente a oscilações da maré, constituindo os sedimentos de planície de maré. Mais raramente ocorrem depósitos de mangues.

d) Depósitos Marinhos pré-atuais

Os depósitos Marinhos pré-atuais são constituídos por sedimentos depositados quando o nível do mar encontrava-se acima do atual, formando os depósitos marinhos pleistocênicos da formação Cananéia. Tratam-se de sedimentos

marinhos arenosos bem selecionados com granulometria fina a média, dispostos atrás dos sedimentos de praia atual na forma de terraços. Estão representados nas porções mais elevadas das planícies marinhas de Caraguatatuba e Guaecá. Em alguns locais estão parcialmente recobertos por cordões litorâneos parcialmente preservados.

e) Depósitos mistos pré-atuais

Os depósitos mistos pré-atuais são formados por sedimentos argilosos e arenosos finos a areno siltosos. Foram depositados também quando o nível do mar era diferente do atual, provavelmente num ambiente de rios e lagoas próximos ao mar. Em geral, estes depósitos estão recobertos por sedimentos continentais e seu reconhecimento segundo IG (1996) só foi possível em trincheiras e escavações para obras de saneamento. A Figura 4.1 mostra as unidades litológicas presentes na área.

4.1.2 Considerações sobre a Geologia Estrutural

O município de São Sebastião está localizado na parte sudeste do Cinturão transpressivo Ribeira (750 – 500 Ma). Este cinturão inclui Zonas de cisalhamento transcorrentes, sistemas de cavalgamento, duplexes direcionais e estrutura em flor. O município especificamente é cortado de oeste para leste por grandes Zonas de cisalhamento com extensões quilométricas, denominadas Zona de Cisalhamento Bairro do Alto (ZCBA), Zona de Cisalhamento Camburu (ZCC) e na porção leste – nordeste pelo sistema de Cavalgamento São Sebastião.

a) Zonas de Cisalhamento

As Zonas de cisalhamento correspondem as grandes estruturas regionais com extensões quilométricas. A Zona de Cisalhamento transcorrente do Bairro Alto (ZCBA), apresenta orientação sudoeste – nordeste, e afeta o granito Pico do Papagaio (Granito porfirítico), produzindo uma foliação milonítica bem desenvolvida e extensa. Estende-se ao longo da costa do Estado de São Paulo desde Guarujá até Ubatuba com extensão de cerca de 150 Km e regionalmente tem um caráter

sinuoso. No município de São Sebastião tem orientação Sudoeste – nordeste com uma extensa e bem marcada foliação milonítica, responsável pelas estruturas do granito pico do papagaio. Caracteriza-se por uma foliação milonítica com mergulho subvertical SSE e lineação subhorizontal com caimento suave para NE.

A Zona de Cisalhamento transcorrente Camburu (ZCC), situa-se a sudeste da Zona de cisalhamento Bairro Alto, distando cerca de 20 Km daquela. Os limites dessa zona não estão definidos com clareza, nos trabalhos existentes na área. É composta por uma zona de alta deformação com extensão de aproximadamente um quilômetro ao longo do vale do rio Camburu, seguida por uma zona de menor deformação, a leste tem orientação NE e mostra uma foliação subvertical com ângulos variando entre 85 e 60⁰ com caimento para NW.

Entre as Zonas de Cisalhamento Bairro Alto e Zona de Cisalhamento Camburu a foliação gradualmente vai ficando mais suave com ângulos entre 60 e 30⁰ para SE.

O Sistema de Cavalgamento São Sebastião contém duas zonas principais de cavalgamento, uma que ocorre próximo a praia de Guaecá, e uma segunda que ocorre próximo a cidade de São Sebastião. A primeira zona de cavalgamento ocorre próximo à encosta da Serra do Mar no contato entre o complexo gnáissico – migmatítico e o granito guaecá na praia de Guaecá. Essa zona de cavalgamento segundo Maffra (2000) corresponde a intercalações centimétricas a métricas destas duas unidades geológicas. A foliação nesta, apresenta mergulhos suaves entre 30 e 20⁰ com caimento para NW.

A segunda zona ocorre ao longo do granito Guaecá formando uma faixa bem extensa, com foliação milonítica bem mais pronunciada do que na anterior, subhorizontal com ângulos que variam entre 30 e 10⁰ para NNW.

Entre as Zonas de Cisalhamento Camburu e o sistema de cavalgamento de São Sebastião, a foliação mantém subvertical como acontece na primeira, porém seu mergulho muda de SE para NW, sendo que a mudança ocorre na Porção de menor deformação. Segundo Maffra (2000) a primeira orientação seria devido a proximidade com a Zona de Cisalhamento Camburu, seria devido ao cavalgamento para SE.

b) Foliação

Como visto anteriormente o comportamento da foliação varia bastante ao longo da área do município, e estão subordinadas as grandes estruturas regionais. Assim, associada à Zona de Cisalhamento Bairro do Alto, desenvolveu-se uma foliação milonítica subvertical disposta predominantemente segundo a direção Sul - Sudeste (SSE). Segundo Maffra (2000) a partir dessa Zona de cisalhamento em direção ao leste, entre Boracéia e Juqueí a foliação passa a apresentar mergulhos variando de 30 a 60° para sudeste (SE). A partir de Juqueí, os mergulhos são altos com caimento para Noroeste (NW), e vão diminuindo gradativamente até que, no trecho entre Maresias e Toque-Toque torna-se subhorizontal com inclinação para Norte-Nordeste (NNE). De Toque-Toque em diante, na porção leste do município, passando pelo centro de São Sebastião até o Bairro das Cigarras, a foliação inclina-se para noroeste (NW) em ângulos baixos. Do extremo nordeste (Ponta do Camaroeiro) até o Bairro Jaraguá, no extremo norte do município volta a ter mergulhos altos com inclinação para noroeste (NW).

c) Falhas e Fraturas

As estruturas rúpteis da área são originadas por esforços de natureza tectônica. Estão presentes na área tanto fraturas e juntas quanto falhas, marcadas por planos estriados, ocorrendo em escala de milimétrica a métrica. Esses planos ocorrem ao longo de toda área, sendo que os sistemas estriados com orientação para nordeste, sub paralelos à foliação são os mais comuns.

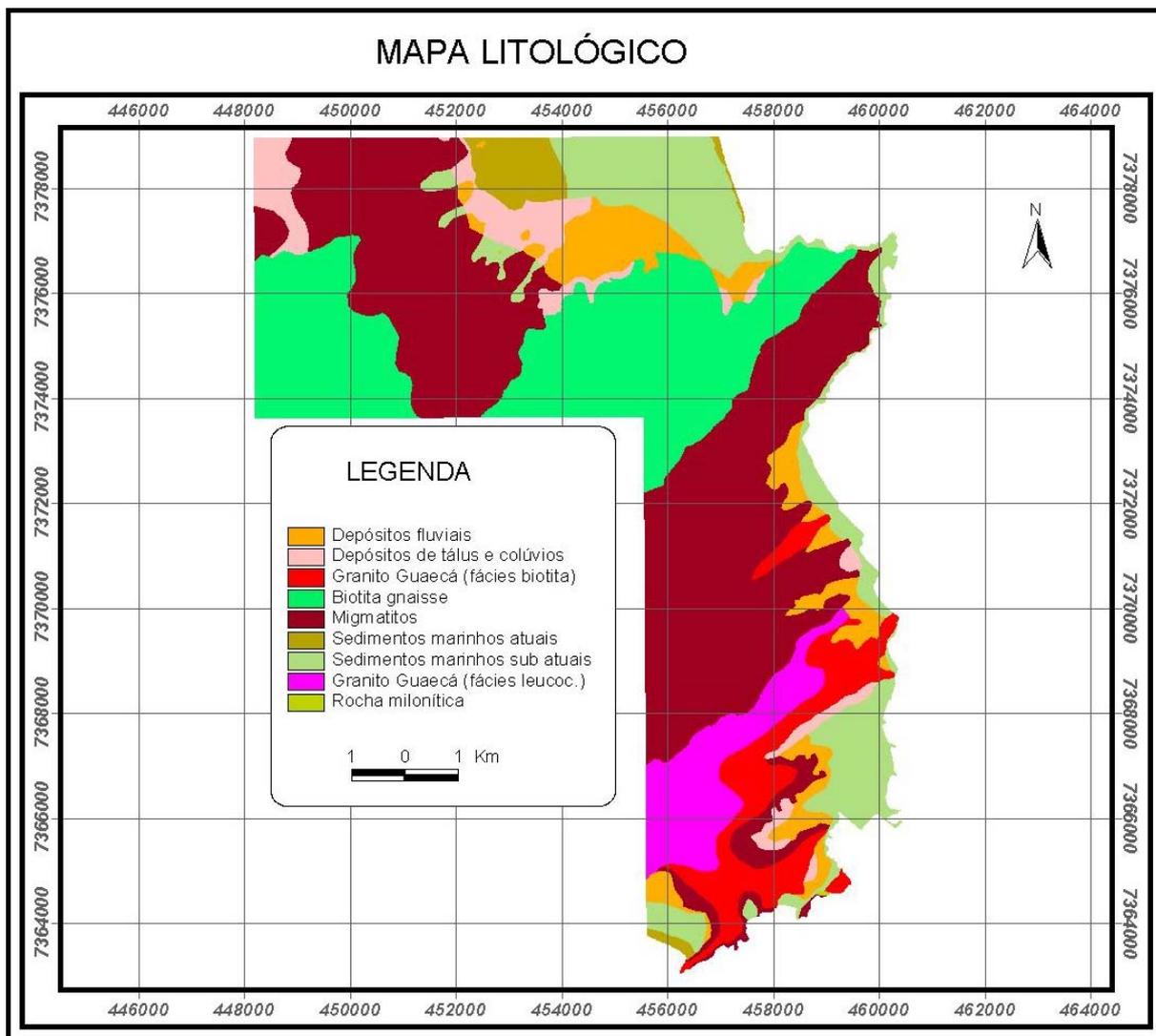


Figura 4.1 Mapa das unidades litológicas da área de estudo (Modificado de Maffra, 2000)

4.2 GEOMORFOLOGIA

A geomorfologia do município de São Sebastião foi obtida de IG (1996), que identificou e caracterizou os diversos tipos de relevo da área correlacionando-os com as grandes divisões geomorfológicas do Estado de São Paulo de Ponçano *et al.* (1981). As unidades definidas foram Planalto, Serrania Costeira e Baixadas Litorâneas.

PLANALTO: Essa unidade foi subdividida em duas sub-unidades: Morros e morrotes de planalto fazendo parte regionalmente do Planalto de Juquirequerê, e os morros altos que regionalmente estão inseridos no planalto Paulistano.

A unidade morros altos é a que apresenta maior suscetibilidade a movimentos de massa devido as maiores amplitudes de relevo que a mesma apresenta, contudo esta é predominantemente natural uma vez que as áreas onde esta se situa são esparsamente ocupadas, e a interferência antrópica é muito baixa.

SERRANIA COSTEIRA: Nessa grande unidade foram identificadas quatro sub unidades de relevo: Morros e morrotes litorâneos, escarpas em anfiteatro, escarpas em espigões digitados e escarpas com segmento retilíneo predominante.

Os morros e morrotes litorâneos acompanham a orla marítima ou estão situados na planície costeira, correspondendo aos setores mais rebaixados das encostas da serra do mar. São unidades com topos convexos e alongados, solos mais espessos e depósitos de tálus e colúvios. As atividades antrópicas nessa unidade são mais freqüentes, acarretando a intensificação de processos morfodinâmicos como o desenvolvimento de sulcos e ravinas, rastejos e escorregamentos.

As escarpas por sua vez, apresentam declividades elevadas com solos pouco espessos a completamente ausentes nas porções mais íngremes, onde predominam blocos e paredões rochosos. Na base das escarpas pode-se identificar a presença de solos e são comuns a presença de depósitos de tálus e colúvios.

BAIXADAS LITORÂNEAS: Esta unidade foi subdividida em duas subunidades – planícies fluviomarinhas e planícies marinhas. As planícies fluviomarinhas correspondem ao ambiente fluvial atual e respectiva planície de inundação, instalados sobre antigos depósitos marinhos. Encontram sua expressão na porção sudoeste do município onde as escarpas têm um maior recuo, e incluem terraços fluviais e colúvios que atingem a baixada.

As planícies marinhas correspondem ao ambiente litorâneo atual e pré-atual das praias, terraços e cordões litorâneos. A Figura 4.2 mostra as subunidades geomorfológicas presentes na área.

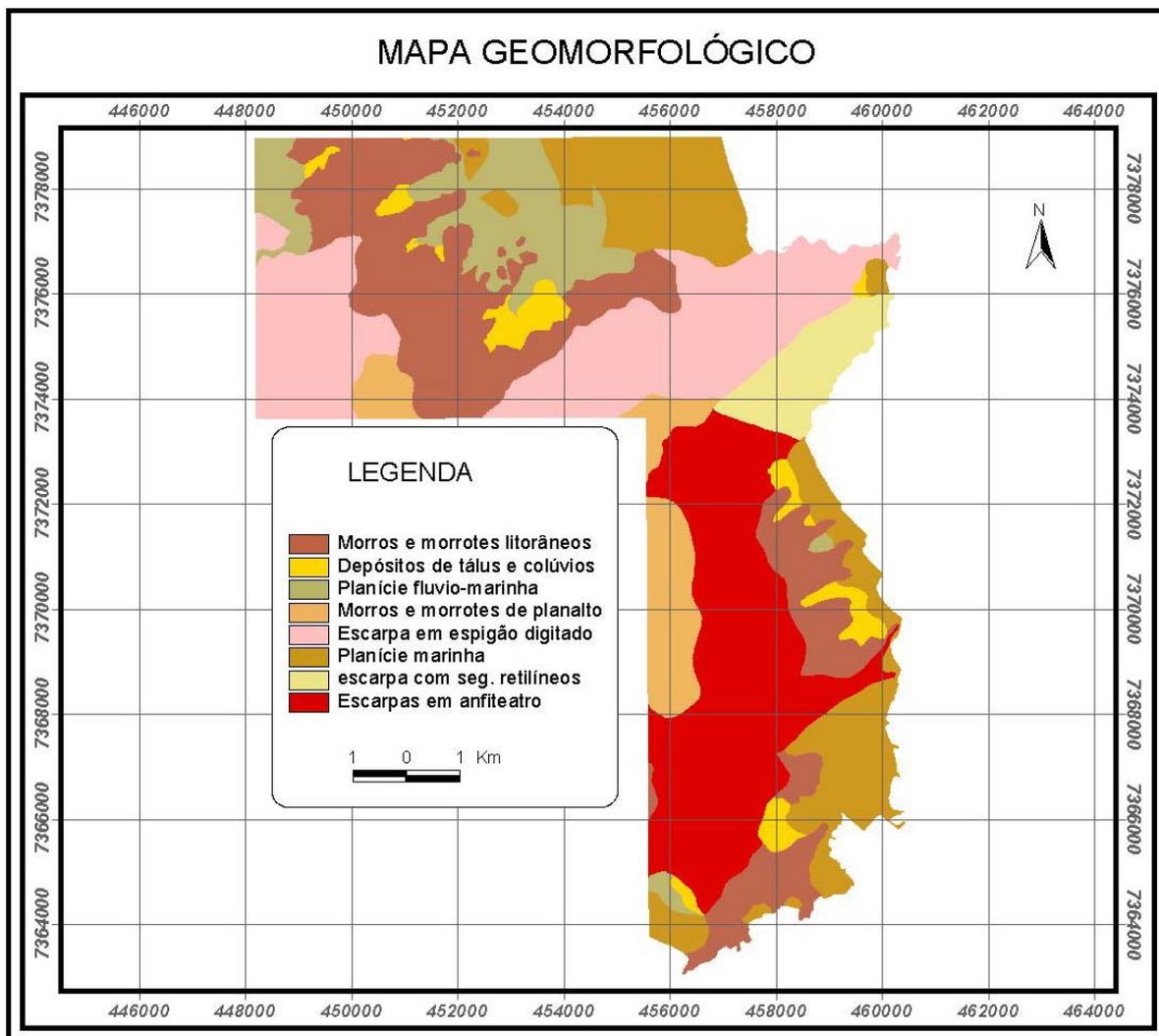


Figura 4.2 - Mapa Geomorfológico da área de estudo (Modificado de IG, 1996)

4.3 VEGETAÇÃO

A vegetação existente na área de estudo está associada principalmente à Mata Atlântica, a qual inclui vegetação de praia, área sem vegetação, o que inclui as áreas urbanas, vegetação secundária, floresta de mata atlântica, mata atlântica alterada, área desmatada, restinga alterada, vegetação degradada, pastagem/culturas, vegetação de várzea, vegetação de várzea alterada e vegetação de mangue alterada. Considerando-se a relativa uniformidade dessa floresta, bem como das feições vegetais associadas às planícies, optou-se por utilizar um mapa de vegetação considerando-se os estágios de degradação da mesma. Tais

uma certa concavidade quando observadas em uma escala mais refinada, especialmente em um modelo numérico do terreno com uma boa resolução.

Em concordância com a maioria dos autores que estudaram os movimentos gravitacionais de massa na Serra do Mar, citando como exemplo IPT (1998), aqui é assumido que os principais eventos que ocorrem na área são os escorregamentos translacionais, amplamente descritos e discutidos na literatura, e as quedas de detritos, que ocorrem associadas às cavidades topográficas, que funcionam como armazenadoras do material instabilizado.

Embora admita-se que dois importantes processos são atuantes na área de estudo, optou-se por considerar os mesmos condicionantes para ambos, assumindo que o peso de um determinado fator possa ser mais ou menos importante dependendo do processo. 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.

4.4.1 Escorregamentos translacionais de solos

Neste trabalho adotou-se as definições de IPT (1988b) e Hutchinson (1988) para os mecanismos e geometria mais comuns dos escorregamentos translacionais de solo, segundo as quais esse processo se deve ao efeito da saturação do solo pela infiltração das águas da chuva, e envolvem basicamente rupturas por cisalhamento e os tipos que mais comumente ocorrem são: lâminas (material não coesivo), lajes (solos coesivos), turfas, rochas (planares em blocos, degraus e com ruptura em cunha) e rupturas de expansão (espalhamento).

4.4.2 Queda de detritos

Muito embora seja aceito aqui que a queda de detritos é um tipo de movimento translacional, de acordo com a proposta de classificação de Freire (1965) modificada por Guidicini & Nieble (1984), como mostra a Tabela 2.4, ele é descrito aqui separadamente, embora tenha sido tratado da mesma forma na análise e no cálculo dos pesos de evidência.

Dietrich & Montgomery (1998) descrevem um tipo de escorregamento raso de solo que ocorre normalmente em regiões com relevo montanhoso, como é o caso da área de estudo, baseado no balanço entre erosão e acúmulo de sedimentos em determinadas regiões da paisagem e no processo responsável por essa dinâmica que seriam principalmente o relevo.

As áreas com paisagens montanhosas em regiões tropicais são cobertas como um manto de solo proveniente do material rochoso subjacente de pequena espessura. Esses solos normalmente possuem baixa densidade e falta uma coesão significativa para mantê-los estáveis quando ocorre uma elevação no nível da água pela saturação do material subjacente. Essa saturação ocorre por ocasião de grandes chuvas. Vale ressaltar que, embora o solo seja muito mais condutor do que a rocha, normalmente ocorre que o substrato rochoso subjacente apresenta um grau de fraturamento elevado e por conseqüência pode conduzir quantidades grandes de água quando por ocasião de grandes chuvas ou de tempestade (Wilson e Dietrich, 1987; Montgomery *et al.*, 1997, Johnson & Sitar, 1989).

Quando o solo é muito condutor, o fluxo superficial é baixo e o transporte do solo é condicionado em sua maioria pela inclinação do terreno, de modo que o padrão espacial da espessura do solo reflete o contrapeso local da produção de material pelo substrato rochoso subjacente e a erosão ou a deposição líquida devido ao transporte em baixas declividades de materiais detríticos (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 do transporte do solo ou detritos, causando uma acumulação do solo se não houver nenhuma canaleta ou canal atual para remover esse material. Dietrich & Montgomery (1998) propõem a utilização do termo “*hollows*” para designar a

cavidade, depressão ou qualquer recorte na vertente que possa armazenar os depósitos de solos ou detritos

Por outro lado, nos cumes quando existe algum transporte, este tende a ser divergente em mais de uma direção. Dietrich *et al.*, (1995) propuseram um modelo que combinasse a produção do solo com o transporte para prever o padrão espacial da espessura do solo. Este modelo prevê corretamente a tendência observada de que os solos sejam espessos nos vales não canalizados e diluídos nos cumes. Nesses últimos, o manto do solo é móvel, camada altamente condutora do colúvio que varia na espessura de uma maneira relativamente sistemática através da paisagem.

As paisagens montanhosas dissecadas geralmente apresentam uma rede ramificada de vales ao longo dos quais o transporte de sedimentos é concentrado. Nem todos os vales apresentam canaletas, como é o caso das drenagens secundárias que geralmente aparecem como depressões sutis.

Em tal paisagem, onde a topografia é representada por solos acamados 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 acomodar-se 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, caso em que o escorregamento é mais profundo podendo chegar até o substrato rochoso. Estes fluxos originam-se tipicamente em vales não canalizados, nas pontas da rede de drenagem.

Dietrich e Dunne (1978) e Dietrich *et al.* (1982) propuseram um modelo em que vales não canalizados submetem-se a um ciclo de 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, especialmente a 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 Dunne (1991), Sidle (1992), entre outros.

4.5 HISTÓRICO DA OCUPAÇÃO HUMANA

Apresenta-se aqui um breve histórico da ocupação humana no Município de São Sebastião, com o objetivo de embasar o trabalho de extração de obtenção da área de ocupação urbana consolidada, entre os anos de 1977 e 2000, para o posterior confronto com o mapa de suscetibilidade.

Assim como no restante do país, a história da ocupação humana no litoral do Estado de São Paulo, sempre se deu a partir das margens dos rios, sobre grandes áreas de mangue, de florestas de restingas e, especialmente no Estado, deu-se também em áreas com relevos acidentados, originalmente ocupados pela Mata Atlântica.

O Litoral Norte paulista, apesar do processo de ocupação, conservou grande parte de sua paisagem primitiva pelo menos até a abertura da rodovia Rio – Santos, que aconteceu em 1975. Os diversos ciclos de ocupação ocorridos antes não desfiguraram sua paisagem. São Sebastião guarda resquício de sua trajetória histórica, como o patrimônio arquitetônico, a documentação histórica e uma identidade cultural baseada no modo de vida caiçara

Antes da colonização portuguesa, a região de São Sebastião era ocupada por índios Tupinambás ao norte e Tupiniquins ao sul, sendo a serra de Boiçucanga - 30 km ao sul de São Sebastião, uma divisa natural das terras das tribos.

A ocupação portuguesa ocorreu com o início da história do Brasil, após a divisão do território em Capitânicas Hereditárias. A capitania de São Vicente, onde se encontrava São Sebastião, foi a pioneira no cultivo da cana de açúcar, mas devido à ausência de grande quantidade de terras planas que facilitassem a implantação da agroindústria essa região voltou-se para o cultivo da agricultura de subsistência baseada em roças de mantimento, cana e algodão. Somente em fins do século XVIII cresce a produção de açúcar para a exportação.

As primeiras atividades econômicas desenvolvidas com o início da povoação da região, foram a agricultura e a pesca, e apesar da carência de grandes área

planas que facilitassem o cultivo, a existência dos engenhos de cana de açúcar foi responsável tanto pelo desenvolvimento econômico quanto pela caracterização como núcleo habitacional e político. Isto possibilitou a emancipação político-administrativa de São Sebastião em 1636.

Durante a primeira metade do século XVIII essa região experimentou um período de crescimento. No início do século XIX os tempos foram difíceis devido à investida e constantes ameaças dos piratas que percorriam a costa, levando o terror às populações, o que só desapareceria a partir de 1830.

Além da cana de açúcar o desenvolvimento econômico baseou-se em outras culturas como o café, o fumo e pesca da baleia. O porto local era utilizado para o transporte de mercadorias e também pelos navios que faziam o transporte do ouro das Minas Gerais, e também por piratas e contrabandistas.

No século XX, nos anos 40, implanta-se a infra-estrutura portuária e nos anos 60 é construído o terminal marítimo de petróleo Almirante Barroso da Petrobrás (TEBAR), fatores decisivos para a retomada do desenvolvimento econômico. O porto desempenhou um importante papel no desenvolvimento de São Sebastião, pois representava um importante elo de ligação entre o centro administrativo da colônia, da metrópole, as vilas e os povoados do interior. Além disso, funcionou como escoadouro de produtos como açúcar, aguardente, ouro, tabaco, café, cerâmica, madeira, etc.. e receptor das importações de ferragens, tecidos, pequeno maquinário, instrumento médico, papel, móveis, louças, porcelanas, etc...

A "descoberta" de São Sebastião, como destino turístico, aconteceu depois da abertura da rodovia Rio - Santos nos anos 70, o que veio proporcionar à região como um todo mais uma oportunidade de desenvolvimento, agora baseada na exploração do turismo, o que representa hoje uma vocação assumida pela população local como maneira de movimentar sua economia.

O próprio plano diretor do município previu a adoção do turismo pela administração municipal como um indutor do desenvolvimento, aproveitando-se das condições oferecidas pelo mar, praias e serra do mar através da implantação de empreendimentos de grande porte em área destinada como de uso potencial para fins turísticos, incentivo às atividades culturais e restauração do centro histórico e incentivo ao ecoturismo e esportes náuticos.

Atualmente, ainda não existe infra-estrutura para suprir essa demanda turística, o que tem gerado conflitos negativos e pressões sobre o meio ambiente

atingindo diretamente a qualidade de vida das populações locais. Apesar das pressões sócio-econômicas serem intensas, nesse trecho do litoral, uma grande parcela do município ainda está preservada, conservando seu ecossistema onde aparecem importantes maciços vegetais de florestas de encosta, pertencentes ao parque Estadual da Serra do Mar, protegido como área de preservação permanente.

O Parque Estadual da Serra do Mar, que no Município de São Sebastião ocupa uma área de 320 Km², é considerado de importância vital para a preservação da biodiversidade da mata atlântica, para a manutenção da qualidade e disponibilidade de água de abastecimento, bem como para manter a estabilidade do terreno com relação aos movimentos gravitacionais de massa. Dentre todos os locais onde ainda existe mata atlântica dentro do Estado de São Paulo, bem como em outros estados brasileiros, esse parque é um dos maiores remanescentes florestais e umas das razões para que ele tenha permanecido assim é provavelmente a forma do relevo, o que torna as encostas muito íngremes para uma ocupação ainda mais intensiva do que a foi praticada ao longo do tempo.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 MODELAGEM WOFE

Neste item é apresentado o resultado da modelagem pesos de evidência WOFE aplicada aos escorregamentos de um trecho da Serra do Mar paulista no Município de São Sebastião, com o objetivo de mostrar possíveis associações espaciais entre os condicionantes do meio físico, utilizados na análise. Os procedimentos contemplam a transformação dos condicionantes em mapas quantificados que permitam uma avaliação da suscetibilidade. As etapas para a aplicação da modelagem proposta encontram-se descritas no Capítulo 3, e contemplam: (1) Estabelecimento dos parâmetros da análise; (2) Cálculo estatístico da medida da associação espacial entre as classes dos mapas de evidências, e conversão dessas medidas em pesos; (3) Análise da distribuição dos pesos de evidência em cada mapa e seleção dos limites para reclassificação binária; (4) Verificação e avaliação da independência condicional entre as evidências; (5) Integração entre os mapas de evidências binários reclassificados e ponderados, para a produção de um mapa de suscetibilidade; (6) Avaliação das tabelas de variâncias, para produzir os mapas das incertezas totais da modelagem. A modelagem WOFE foi implementada de duas formas, a primeira considerando declividade como evidência e a segunda excluindo declividade e considerando a carta de energia do relevo, que já a inclui na análise.

5.1.1 Evidências utilizadas na modelagem

As evidências utilizadas na modelagem são os elementos do meio físico, com seus atributos, selecionadas como condicionantes dos movimentos de massa. Assim, foram considerados: mapa litológico, com 9 classes; mapa geomorfológico, com 8 classes; mapa de cobertura vegetal, com 11 classes; mapa de declividade, com 5 classes; mapa de exposição de vertentes, com 9 classes; mapa hipsométrico, com 6 classes; mapa de forma das vertentes, com 4 classes e, finalmente, mapa de energia do relevo, com 6 classes. A descrição desses

temas, bem como seu significado para a análise, foram realizadas no Capítulo 2. Os mapas litológico e geomorfológico, utilizados nesse trabalho, foram apresentados no Capítulo 4, referente à caracterização da área, os demais são mostrados a seguir.

5.1.1.1 Forma das vertentes

Com o objetivo de estabelecer correlações entre os eventos e as formas, foi elaborada uma carta temática de forma das vertentes a partir das cartas topográficas na escala 1:10000, com base na forma das curvas de nível. Foram consideradas as seguintes unidades: vertente côncava, vertente convexa, vertente retilínea e áreas planas, representada por planície costeira, planícies fluviais, vales, etc. (Figura 5.1)

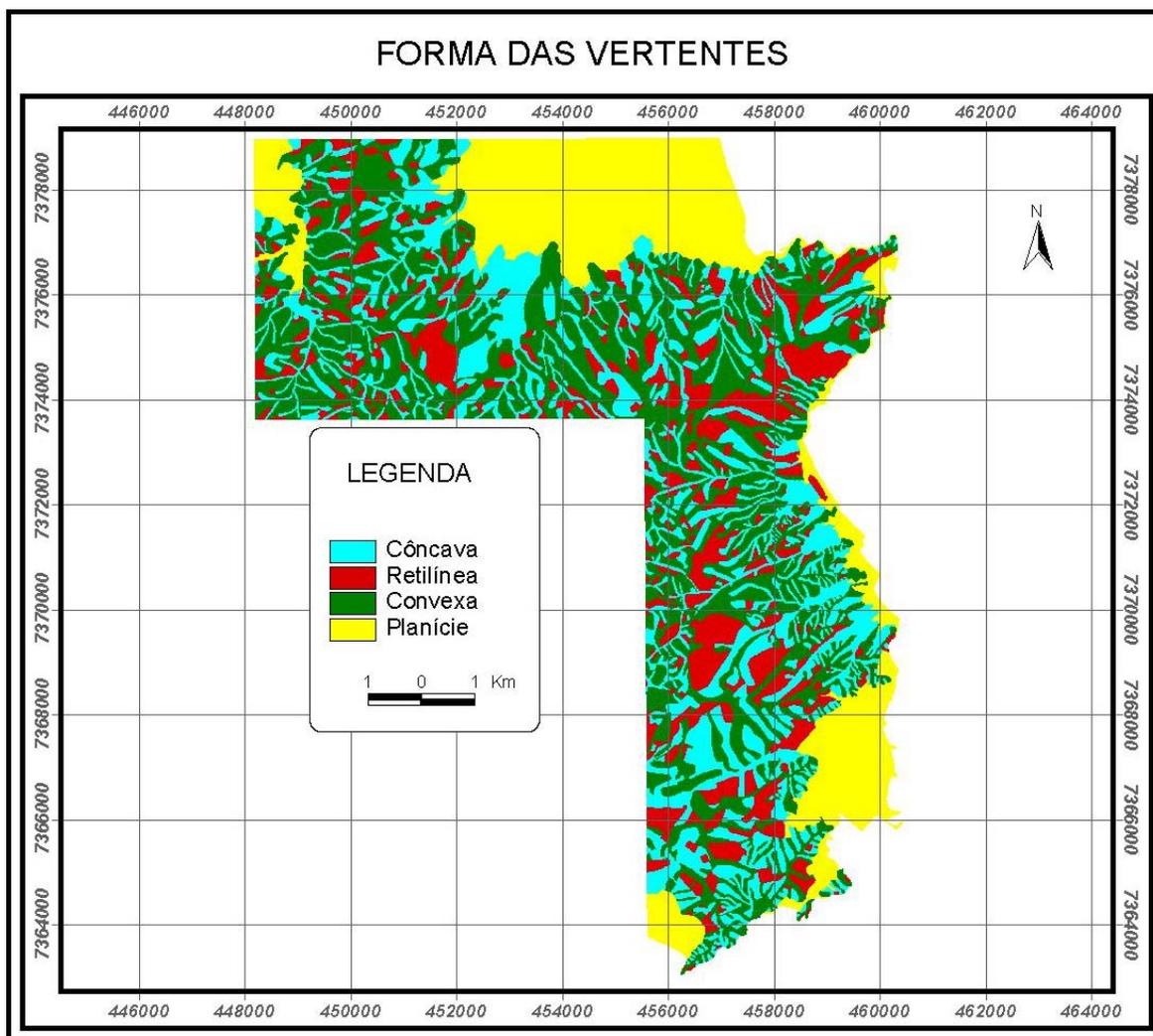


Figura 5.1 – Mapa de forma das vertentes

5.1.1.2 Modelo numérico do terreno e produtos derivados

Conforme descrição feita no Capítulo 3, o **Modelo Numérico de Terreno** (Figura 5.2) foi obtido através da interpolação por triangulação das cartas topográficas na escala 1:10.000, e a partir desse foram derivados os mapas hipsométrico mostrando faixas de altitude, de declividade e de ângulo de exposição das vertentes.

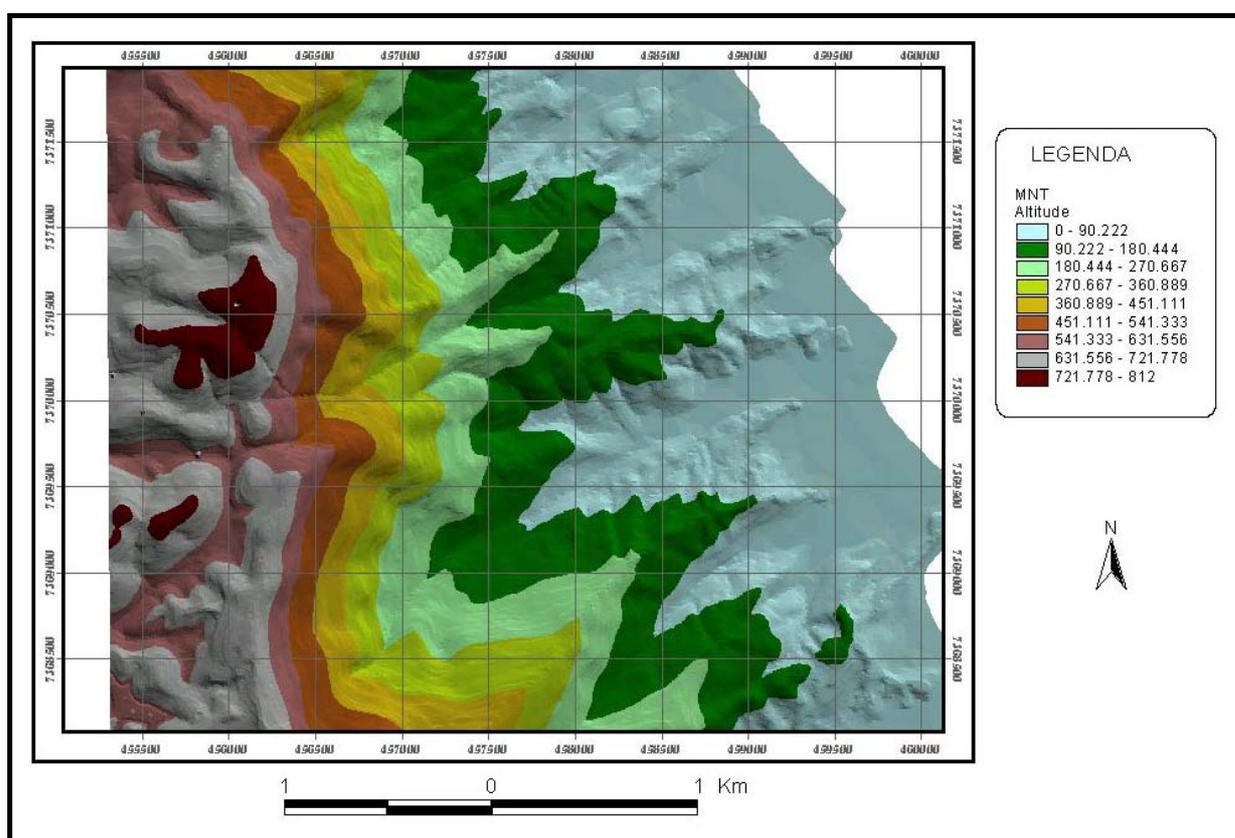


Figura 5.2 – Detalhe do Modelo Numérico de Terreno

Já com relação à declividade, pode-se dizer que os menores valores naturalmente correspondem aos locais mais planos, enquanto os maiores às regiões mais íngremes do terreno. Os valores tanto podem ser expressos em graus quanto em valores percentuais, nesse trabalho esse parâmetro está representado em graus. Com relação à definição dos intervalos de classes, adotou-se a classificação nos seguintes intervalos: $0 - 10^\circ$, $10^\circ - 20^\circ$, $20^\circ - 30^\circ$, $30^\circ - 45^\circ$ e $\geq 45^\circ$. (Figura 5.3)

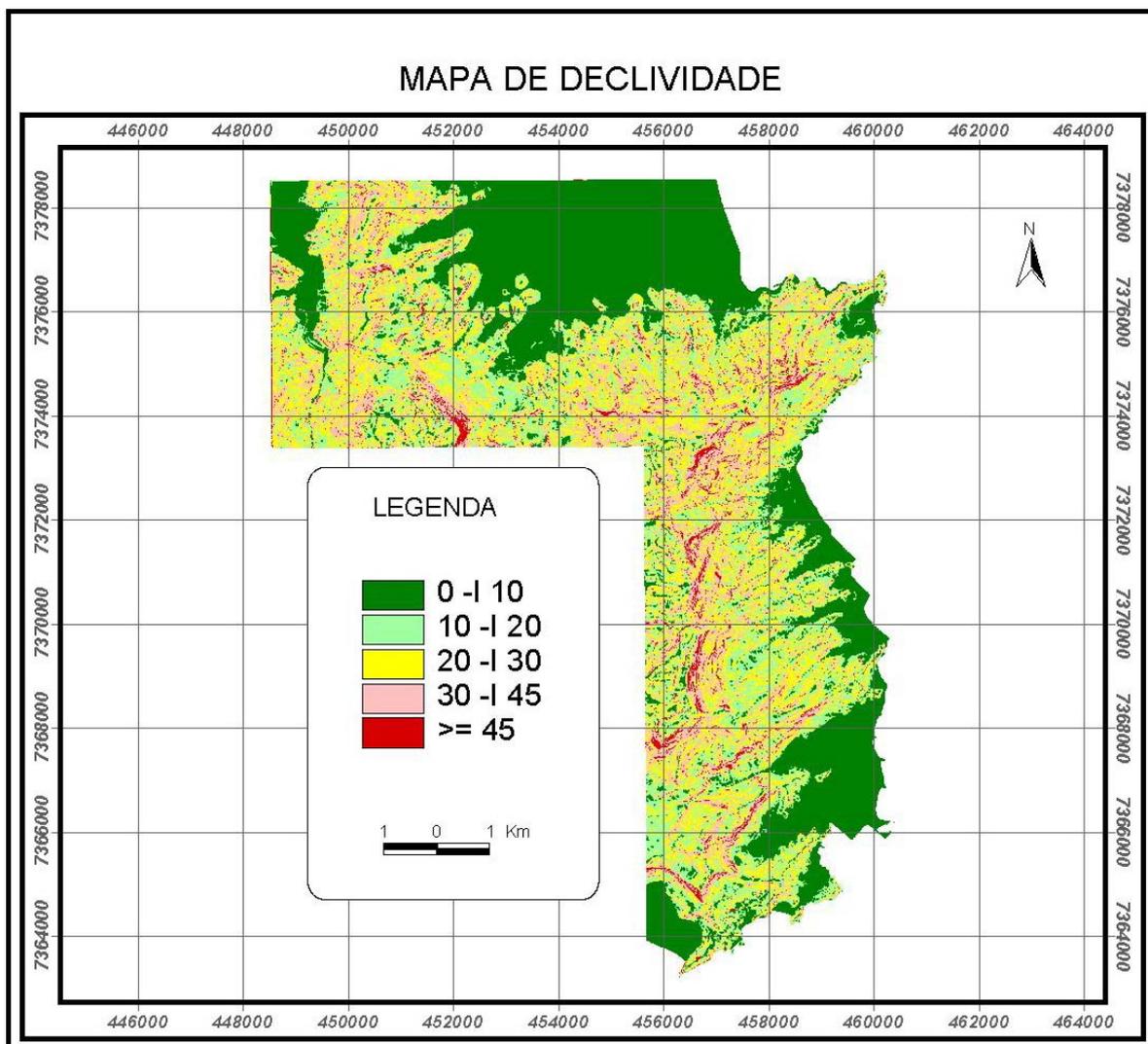


Figura 5.3 - Mapa de declividade da área de estudo, derivado do Modelo Numérico de Terreno.

A exposição de vertentes é uma medida no sentido horário e em graus variando de 0 a 360^o, contados a partir do norte. O valor para cada célula, em um grupo de dados, indica a direção das faces com maior declividade, de modo que regiões totalmente planas, onde a declividade é igual a zero, mostram um valor da exposição igual a -1. (Figura 5.4)

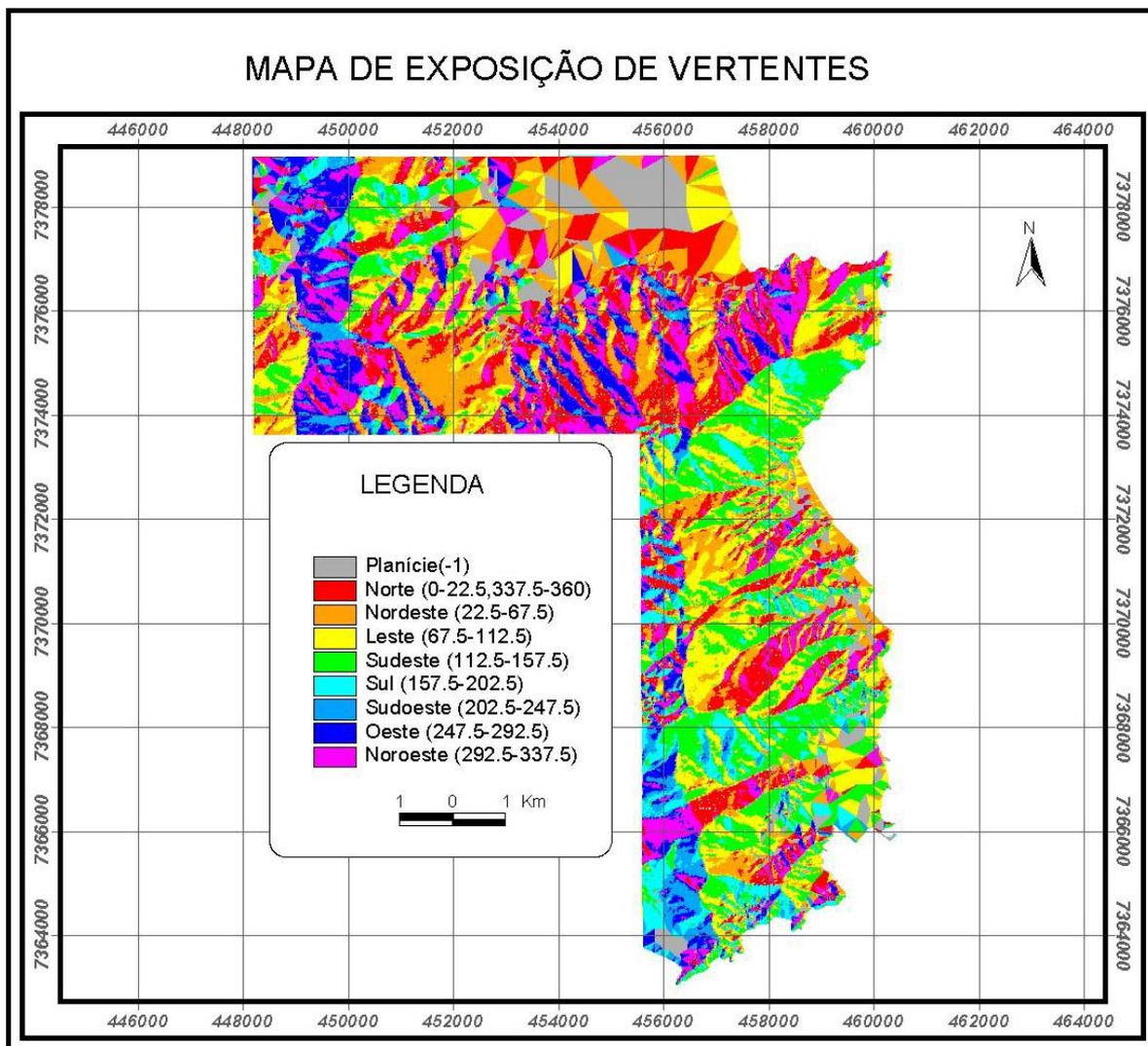


Figura 5.4 - Mapa mostrando os ângulos de exposição de vertentes na área de estudo, derivado do Modelo Numérico de Terreno.

O mapa hipsométrico foi obtido através de uma reclassificação do Modelo Numérico de Terreno, dividido em intervalos de altitude pré-definidos de 0 —| 100m, 100 —| 200m, 200 —| 400m, 400 —| 600m, 600 —| 800m e \geq 800m, como mostra a Figura 5.5

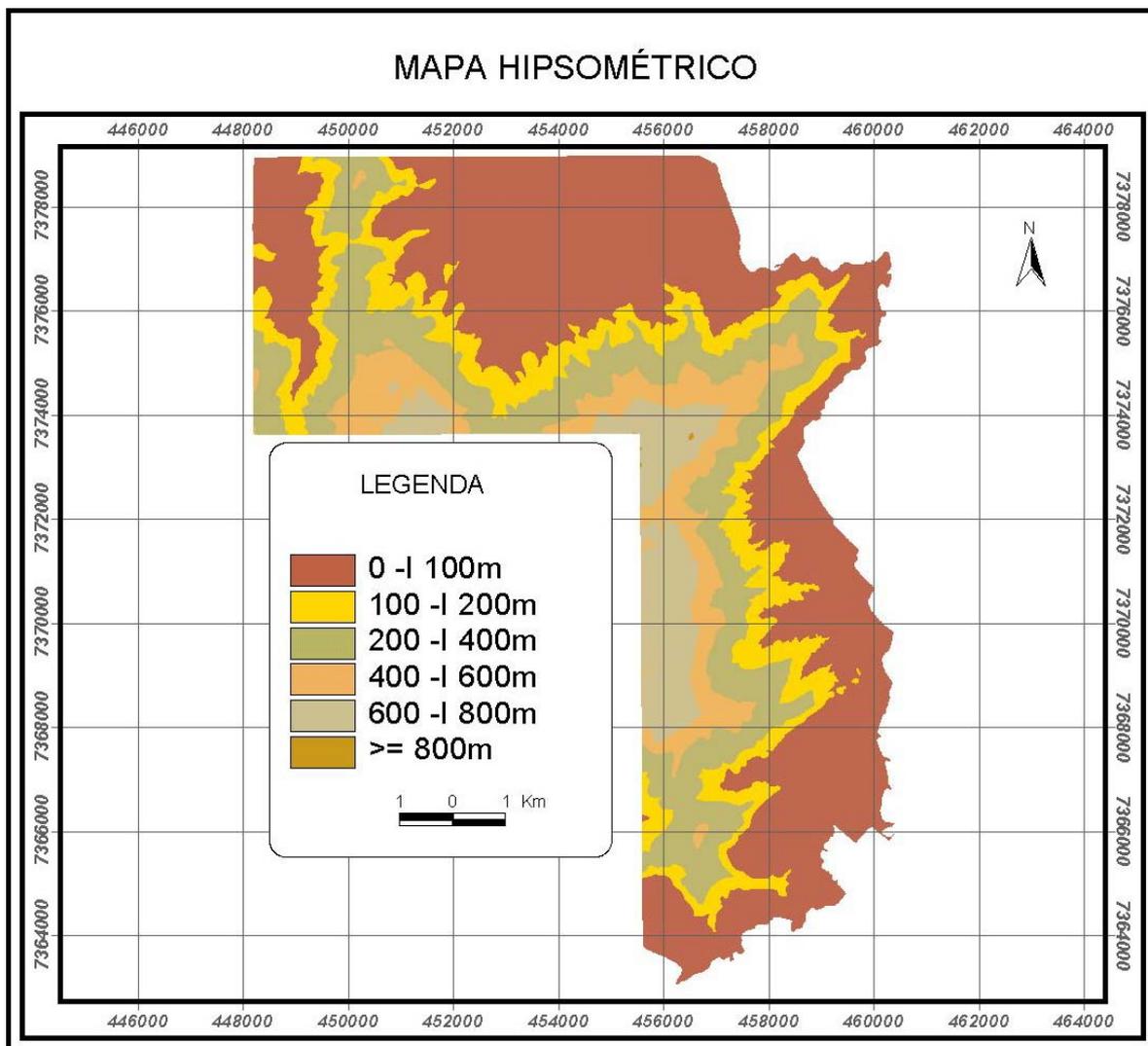


Figura 5.5 - Mapa hipsométrico mostrando intervalos de altimetria, derivado do MNT

5.1.1.3 Carta de energia do relevo

A carta de energia do relevo representa uma síntese das cartas de declividade, dissecação horizontal e dissecação vertical do relevo. Esta carta foi obtida a partir da criação dessas três cartas acima citadas em ambiente semi-automatizado e totalmente automatizado através de operações matemáticas (Figura 5.6). São representadas 6 classes, onde a classe 1 apresenta a menor energia de relevo, enquanto a classe 6 a maior energia. O procedimento para obtenção das três cartas que serviram de base para esta, bem como os procedimentos para a obtenção do próprio mapa de energia do relevo estão escritos no capítulo 3.

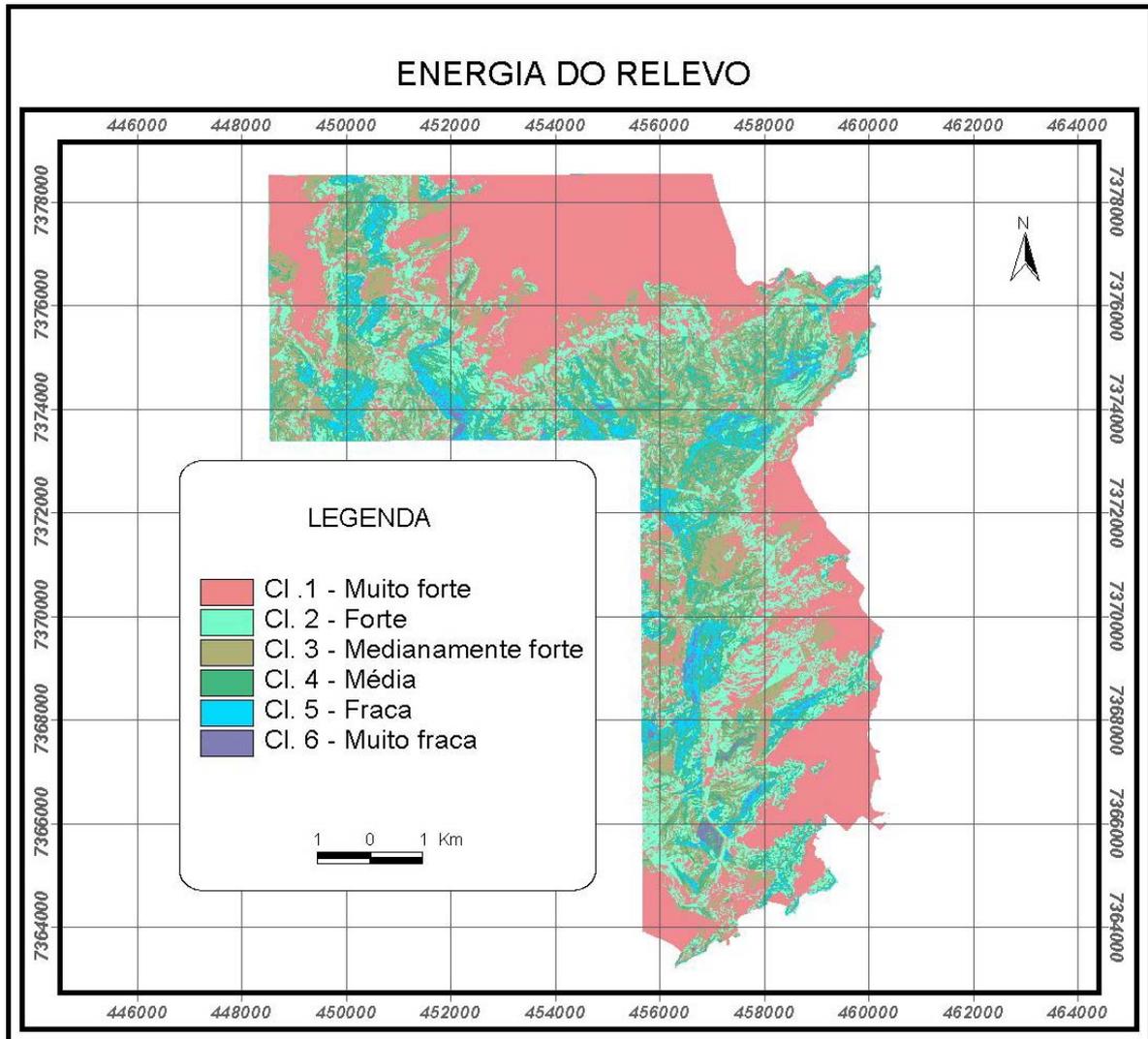


Figura 5.6 - Carta de energia do relevo, obtida pela combinação das cartas de dissecação vertical, dissecação horizontal e mapa de declividade.

5.1.2 Implementação da modelagem WOFE

A modelagem com mapas binários envolve todas as etapas descritas no início desse capítulo, de maneira que nos próximos itens apresenta-se um detalhamento de todas essas etapas, com o resultado obtido em cada uma delas.

5.1.2.1 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 cada uma das evidências consideradas. Os valores dos pesos de evidência variam em função da razão entre a área dos escorregamentos em um padrão do mapa e a área total da ocorrência desses eventos, normalizadas pela razão entre a área do padrão e a área total do mapa. Assim, nos mapas onde os eventos são mais freqüentes que o esperado pelo cálculo da chance, o ponderador é positivo (W^+) e onde os eventos são menos freqüentes 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 que serão 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 os ponderadores de evidência positivo (W^+), seu desvio padrão $s(W^+)$, os ponderadores 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.

Tabela 5.1– Pesos de evidências calculados para o mapa litológico da área, considerando-se cada unidade geológica. 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, selecionadas para a generalização ou reclassificação binária.

Classe	Área	Legenda	Pontos	W+	s(W+)	W-	s(W-)	C	S(C)	C/s(C)
1	5038,9440	Depósitos fluviais	0							
2	3573,4080	Tálus e colúvios	8	-1,2236	0,7073	0,0362	0,0862	-1,2598	0,7125	-1,7680
3	4592,3520	Gran. Guaecá (biotita)	27	1,1336	0,1930	-0,1540	0,0954	1,2875	0,2153	5,9797
4	16372,8320	Biotita gnaisse	20	-0,4424	0,2237	0,1000	0,0925	-0,5424	0,2421	-2,2401
5	27700,1120	Migmatito	73	0,3279	0,1172	-0,2768	0,1251	0,6047	0,1714	3,5277
6	1725,9520	Sed. Litorâneos atuais	0							
7	9142,5760	Sed. Mar.sub atuais	2	-2,1633	0,7072	0,1211	0,0862	-2,2845	0,7124	-3,2066
8	3945,6000	Granito Guaecá (leuc.)	7	-0,0687	0,3783	0,0038	0,0878	-0,0725	0,3884	-0,1867
9	13,320	Rocha milonítica	0							
-99	0,1920		0							

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 5.1, verifica-se que os maiores contrastes 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 planares, muito comuns na área.

Tabela 5.2 - Pesos de evidências calculados para o mapa com as unidades geomorfológicas da área. A área das classes é categórica e as linhas destacadas indicam as classes selecionadas para reclassificação binária.

Classe	Área	Legenda	Pontos	W⁺	s(W⁺)	W⁻	s(W⁻)	C	S(C)	C/s(C)
1	16,0218	Morros e morrotes lit.	56	0,6111	0,1339	-0,2747	0,1112	0,8858	0,1740	5,0905
2	2,5834	Tálus e colúvios	9	0,6079	0,3339	-0,0315	0,0885	0,6394	0,3454	1,8510
3	6,3718	Plan. fluvio-marinha	0							
4	4,3531	Morros, morrot. planalto	6	-0,3215	0,4085	0,0175	0,0875	-0,3390	0,4178	-0,8115
5	14,4224	Escarpa em esp.digit.	9	-1,1147	0,3334	0,1555	0,0885	-1,2702	0,3450	-3,6820
6	11,2883	Planície marinha	0							
7	2,9251	Escapas retilíneas	12	-1,0233	0,7073	0,0268	0,0862	-1,0500	0,7126	-1,4735
8	14,1394	Escarpas em anfit.	45	0,5171	0,1493	-0,1802	0,1043	0,6974	0,1822	3,8284
-99			0							

Esses resultados expostos na Tabela 5.2 mostram que com relação à geomorfologia, 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 significativos, correspondendo aos locais onde normalmente ocorrem os movimentos gravitacionais do tipo “quedas de detritos” e a classe 2, equivalente à forma de relevo do tipo tálus e colúvios.

Tabela 5.3 - Pesos de evidências calculados para o mapa de cobertura vegetal. A área das classes é categórica e as linhas em destaque indicam as classes selecionadas para reclassificação binária.

Classe	Área	Legenda	Pontos	W^+	$s(W^+)$	W^-	$s(W^-)$	C	S(C)	C/s(C)
1	15,9471	Sem vegetação	54	0,5793	0,1363	-0,2516	0,1098	0,8309	0,1751	4,7465
2	11,9211	Vegetação Séc.	38	0,5187	0,1625	-0,1444	0,1006	0,6631	0,1911	3,4701
3	1,6124	Desmatamento	2	-0,4271	0,7075	0,0079	0,0861	-0,4350	0,7128	-0,6103
4	34,5684	Mata Atlântica	32	-0,7200	0,1769	0,3877	0,0977	-1,1077	0,2021	-5,4820
5	3,8693	Mata Atlântica Alt.	7	-0,0491	0,3783	0,0027	0,0878	-0,0518	0,3884	-0,1335
6	0,0896	Restinga	0							
7	3,5736	Pastagem/culturas	4	-0,5299	0,5003	0,0212	0,0868	-0,5512	0,5078	-1,0855
8	0,4675	Várzea	0							
9	0,0293	Mangue Alterado	0							
10	0,0268		0							

Com relação à evidência “cobertura vegetal”, como era de se esperar, os maiores valores de contraste, conforme os dados da Tabela 5.3, aparecem nas áreas desprovidas de vegetação, incluindo as áreas urbanas, seguido de áreas com vegetação secundária.

Tabela 5.4 - 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	Legenda	Pontos	W^+	$s(W^+)$	W^-	$s(W^-)$	C	S(C)	C/s(C)
1	23,5113	0 - 10°	19	-0,8567	0,2295	0,2462	0,0922	-1,1030	0,2473	-4,4596
2	14,4089	10 - 20°	40	0,3793	0,1583	-0,1224	0,1016	0,5017	0,1881	2,6665
3	18,4792	20 - 30°	38	0,0785	0,1624	-0,0286	0,1006	0,1070	0,1910	0,5604
4	13,3768	30 - 45°	29	0,1314	0,1859	-0,0325	0,0963	0,1640	0,2094	0,7832
5	2,2746	>= 45°	11	0,9364	0,3022	-0,0517	0,0892	0,9881	0,3151	3,1358
-99	0,0544	5,4368	0							

Observa-se, segundo a Tabela 5.4, 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°. De uma maneira geral os valores estão bem distribuídos em um intervalo relativamente amplo de declividade. As maiores declividades estão associadas às encostas retilíneas, e mais expostas aos efeitos pluviométricos, estando portanto sujeitas a movimentos, enquanto as menores declividades provavelmente refletem a dinâmica local, onde a erosão faz com que material se deposite em locais de topografia mais suave, vindo depois a escorregar, impulsionado pelo próprio peso desse material.

Tabela 5.5 - 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	Legenda	Pontos	W^+	$s(W^+)$	W^-	$s(W^-)$	C	S(C)	C/s(C)
1	5,4733	-1	6	-0,5211	0,4085	0,0328	0,0888	-0,5539	0,4180	-1,3252
2	5,5888	Norte	6	-0,5420	0,4085	0,0346	0,0888	-0,5766	0,4180	-1,3794
3	11,7991	Nordeste	15	-0,3728	0,2584	0,0591	0,0921	-0,4319	0,2743	-1,5746
4	11,3807	Leste	24	0,1342	0,2043	-0,0273	0,0959	0,1614	0,2257	0,7153
5	10,3634	Sudeste	28	0,3826	0,1892	-0,0814	0,0977	0,4639	0,2130	2,1785
6	4,4735	Sul	11	0,2881	0,3019	-0,0223	0,0906	0,3104	0,3152	0,9849
7	3,1773	Sudoeste	5	-0,1591	0,4476	0,0068	0,0885	-0,1658	0,4562	-0,3635
8	5,9610	Oeste	11	0,0004	0,3018	0,0000	0,0906	0,0005	0,3151	0,0015
9	13,8878	Noroeste	27	0,0527	0,1926	-0,0130	0,0972	0,0657	0,2158	0,3044
-99	0,0004		0							

Com relação à exposição de vertentes, nota-se na Tabela 5.5 que os maiores valores de contraste estão associados às faces voltadas para sudeste, que corresponde àquelas com maior suscetibilidade para escorregamentos e, secundariamente, aparecem as encostas voltadas para leste e noroeste. Escorregamentos estão intimamente associados às condições de umidade do solo de maneira que as faces mais úmidas em função da maior ou menor incidência dos raios solares apresentam maiores contrastes. Além disso, há coincidência com direções de estruturas geológicas importantes.

Tabela 5.6 - Pesos de evidências calculados para o mapa hipsométrico. A área das classes é categórica e a linha em destaque indica a classe selecionada para reclassificação binária.

Classe	Área	Legenda	Pontos	W^+	$s(W^+)$	W^-	$s(W^-)$	C	S(C)	C/s(C)
1	34,0026	0 -1 100	89	0,3203	0,1061	-0,4109	0,1444	0,7312	0,1792	4,0794
2	11,3021	100 -1 200	19	-0,1234	0,2296	0,0214	0,0921	-0,1448	0,2474	-0,5852
3	14,9326	200 -1 400	14	-0,7081	0,2674	0,1247	0,0903	-0,8328	0,2822	-2,9509
4	6,5373	400 -1 600	4	-1,1352	0,5002	0,0656	0,0868	-1,2008	0,5076	-2,3654
5	5,2623	600 -1 800	11	0,0949	0,3018	-0,0079	0,0892	0,1028	0,3147	0,3265
6	0,0126	> 800	0							
-99	0,0557		0							

Um indicador também utilizado na modelagem é a hipsometria, que mostra a faixa de altimetria entre 0 a 100m como a de maior valor de contraste, segundo os dados da Tabela 5.6, indicando que a maior densidade de escorregamentos ocorrem da meia encosta para a base. Depois desse intervalo, só aparece um maior valor de contraste o intervalo entre 600 e 800m, porém com valor bem menor.

Tabela 5.7 - 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	Legenda	Pontos	W^+	$s(W^+)$	W^-	$s(W^-)$	C	S(C)	C/s(C)
1	18,3077	Côncava	69	0,6863	0,1206	-0,4080	0,1213	1,0943	0,1711	6,3959
2	12,0895	Retilínea	50	0,7795	0,1417	-0,2709	0,1073	1,0504	0,1777	5,9096
3	26,1146	Convexa	17	-1,0729	0,2426	0,3182	0,0914	-1,3912	0,2593	-5,3658
4	15,5542	Planície	1	-3,3886	1,0000	0,2363	0,0859	-3,6249	1,0037	-3,6115
-99	0,0392		0							

Através da Tabela 5.7, 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 da erosão de áreas a montante se acumulam até que o seu peso seja

suficiente para provocar uma ruptura e aconteçam as quedas de detritos. As retilíneas por sua vez, estão relacionadas aos escorregamentos planares.

Tabela 5.8 - Pesos de evidências calculados para o mapa de energia do relevo. A área das classes é categórica e as linhas em destaque indicam as classes selecionadas para reclassificação binária.

Classe	Área	Legenda	Pontos	W⁺	s(W⁺)	W⁻	s(W⁻)	C	S(C)	C/s(C)
1	8,7636	Cl. 1 – Muito forte	12	-0,3281	0,2889	0,0380	0,0895	-0,3661	0,3024	-1,2106
2	13,2344	Cl. 2 - Forte	18	-0,3349	0,2359	0,0621	0,0918	-0,3969	0,2531	-1,5684
3	31,1858	Cl. 3 – Medianamente forte	61	0,0291	0,1282	-0,0227	0,1148	0,0518	0,1721	0,3012
4	18,3832	Cl. 4 - Média	44	0,2314	0,1509	-0,0932	0,1038	0,3246	0,1832	1,7720
5	0,2213	Cl. 5 - Fraca	2	1,5666	0,7103	-0,0117	0,0861	1,5783	0,7155	2,2057
6	0,3145	Cl. Fraca	0							
-99	0,0023		0							

As classes de energia do relevo que apresentam os maiores valores de contraste, são a 4 (media) e 3(medianamente forte) respectivamente, segundo a Tabela 5.8.. A classe 2 muito embora tenha alto valor de contraste, foi desconsiderada por apresentar um valor muito discrepante, além disso apresenta apenas 2 cicatrizes de escorregamentos, mesmo considerando que o que está sendo levado em conta é a correlação espacial. As demais classes mostram valores de correlação espacial em relação aos escorregamentos pouco expressivos.

5.1.2.2 Reclassificação binária

Como foi descrito anteriormente, a modelagem “pesos das evidências” WOFE pode ser executada tanto em mapas com classes múltiplas, quanto em mapas binários, mas estudos têm mostrado que essa modelagem em mapas binários onde a evidência está ausente ou presente, mostram melhores resultados, e de mais fácil interpretação. Dessa forma, para o presente trabalho a modelagem foi aplicada somente a mapas binários.

Para a generalização ou reclassificação dos mapas, o critério de escolha do limite entre classes consideradas como favorável e desfavorável tanto pode se

baseado no julgamento do especialista, quanto ser feita através de medida estatística de correlação espacial. Para esse trabalho, optou-se por utilizar a medida estatística, por considerar que ela torna a análise menos subjetiva, e o parâmetro utilizado para isso, foi a medida do contraste, considerando que as evidências estão presentes ou ausentes para cada mapa, para um dado valor de correlação, conforme mostrado no gráfico da Figura 5.7, que ilustra o exemplo do mapa litológico. Vale lembrar que não apenas a classe de máximo contraste foi selecionada, mas também as que apresentaram um valor próximo deste, de modo a tornar a análise mais representativa. As Figuras 5.8 a 5.15 mostram os mapas com padrões binários resultantes dessa generalização.

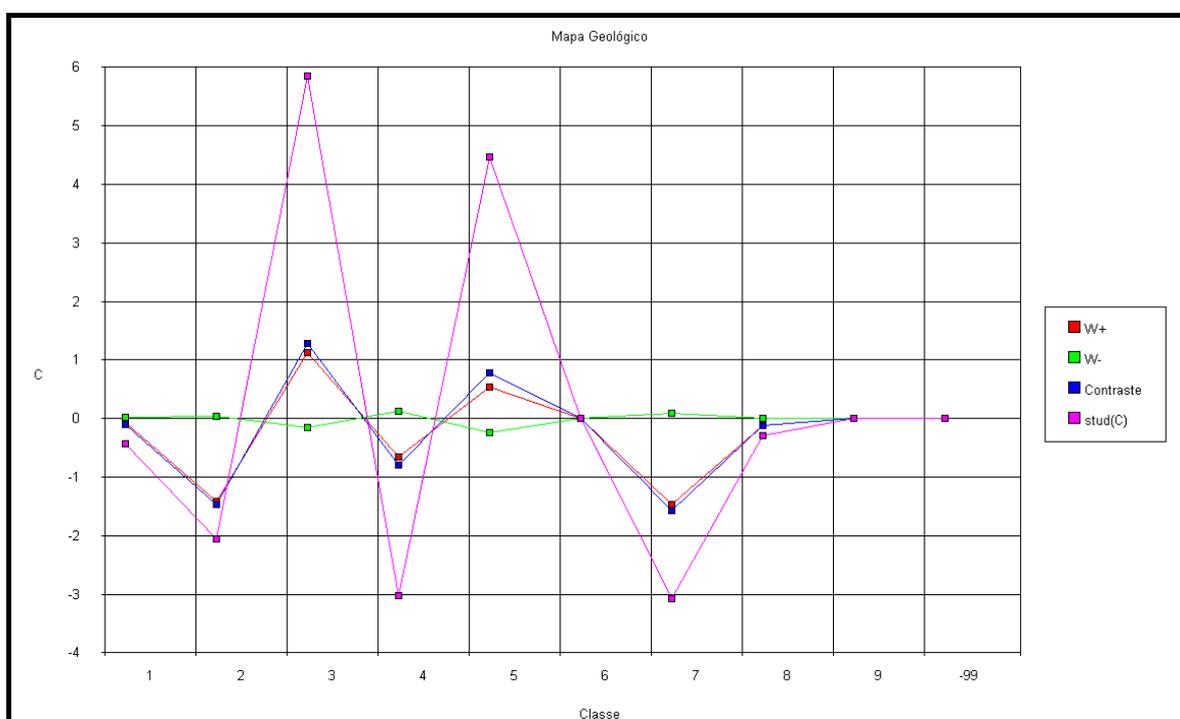


Figura 5.7- Gráfico de variação dos pesos de evidências positivo e negativo (W^+ e W^-), contraste e contraste normalizado pelo teste t de student para o mapa litológico. No eixo das abcissas estão as classes do mapa, representadas por distâncias regulares, e no eixo das ordenadas está o contraste. As classes selecionadas para reclassificação binária, marcadas na Tabela 5.5, são as que possuem maiores valores de contraste.

O resultado dessa operação de generalização das evidências multi classes com base no critério de contraste máximo teve como resultado, a produção de mapas binários, mostrados nas Figuras 5.8 a 5.15. Nessas, logicamente, aparecem apenas duas classes, sendo uma onde a evidência está presente e uma outra onde a evidência está ausente.

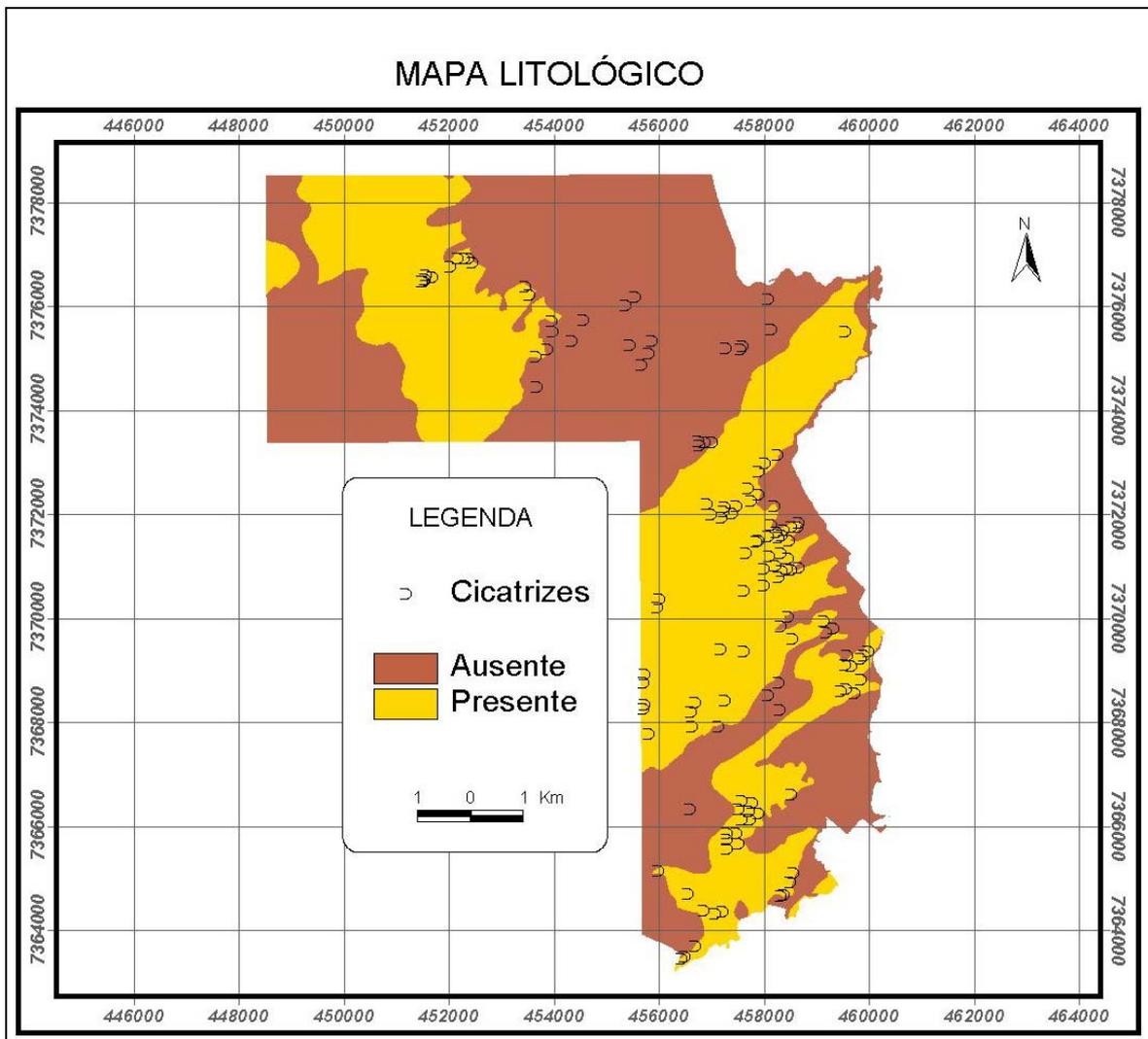


Figura 5.8 - Padrão binário de evidências para a evidência “mapa litológico”, reclassificado de acordo com os contrastes máximos.

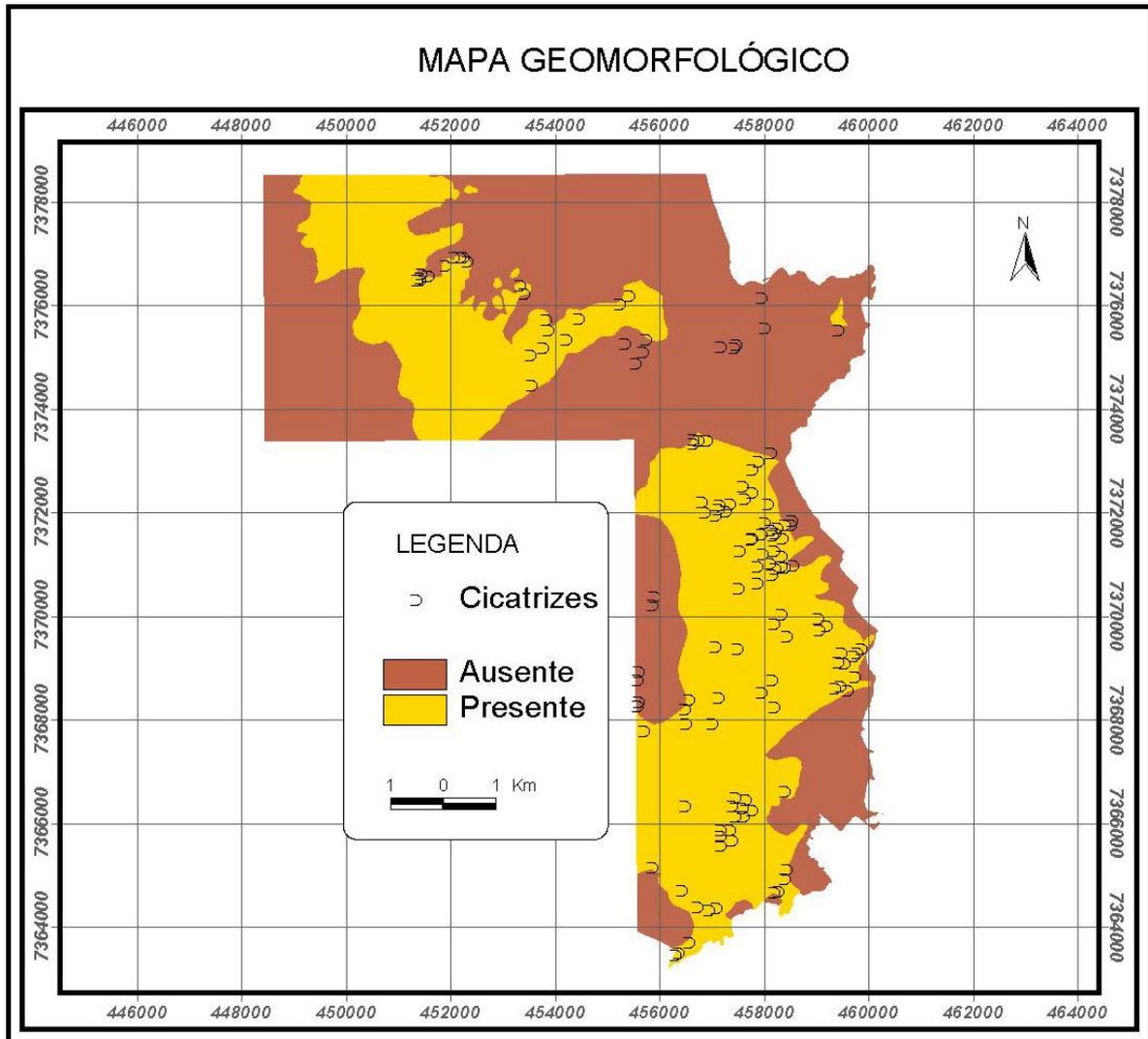


Figura 5.9 - Padrão binário de evidências para a evidência “mapa geomorfológico”, reclassificado de acordo com os contrastes máximos

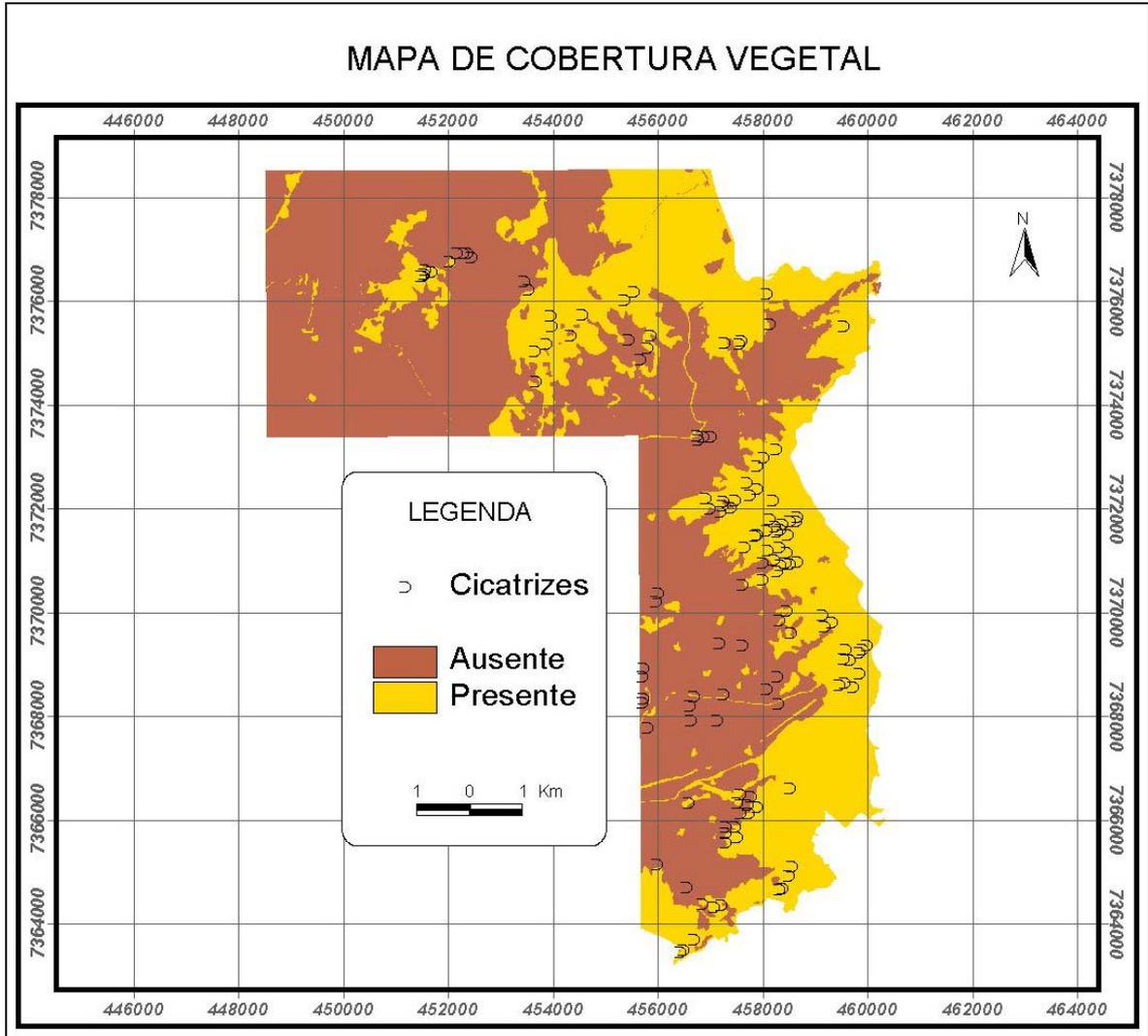


Figura 5.10 - Padrão binário de evidências para a evidência “mapa de cobertura vegetal” reclassificado de acordo com os contrastes máximos

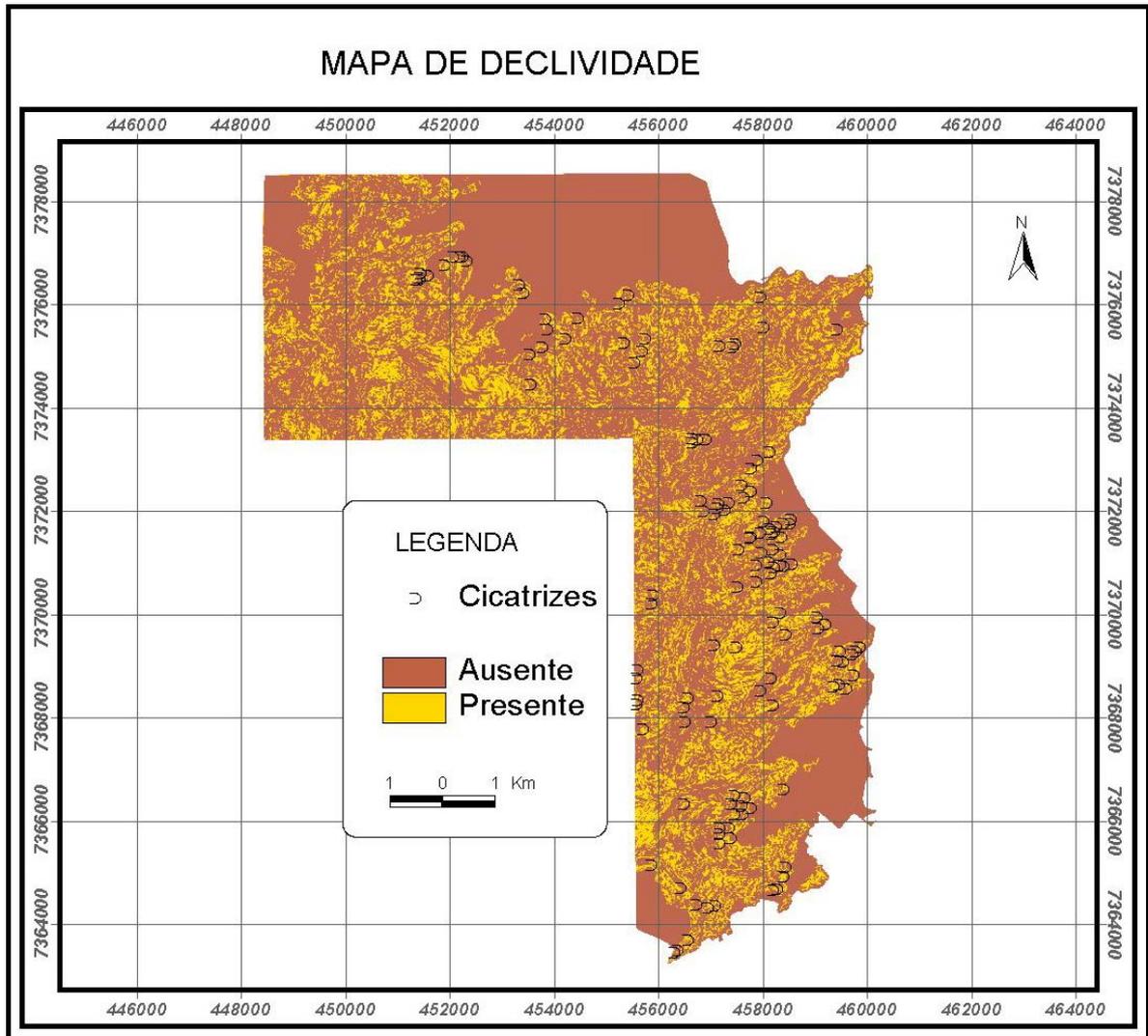


Figura 5.11 - Padrão binário de evidências para a evidência “mapa de declividade”, reclassificado de acordo com os contrastes máximos.

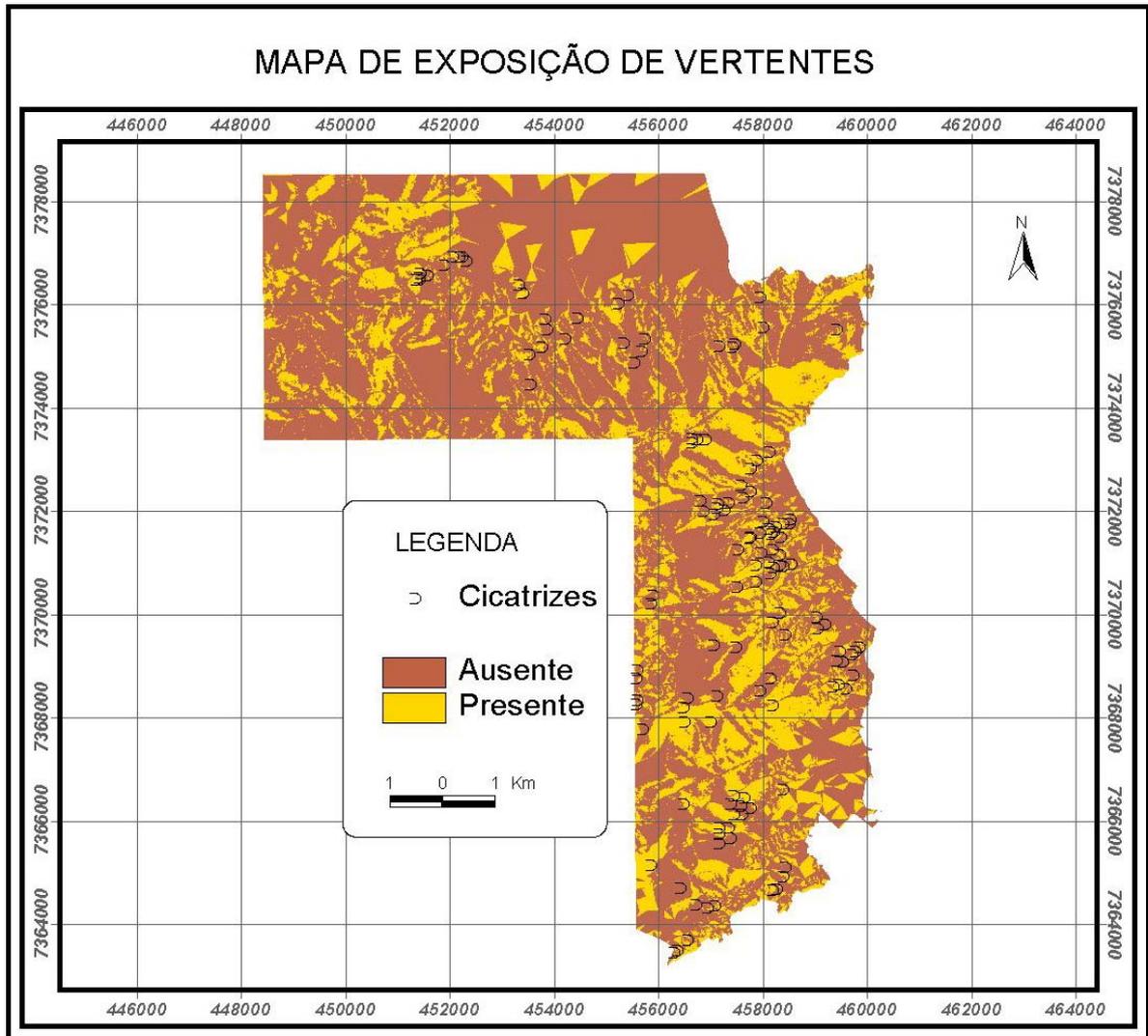


Figura 5.12 - Padrão binário de evidências para a evidência “mapa de exposição de vertentes” reclassificado de acordo com os contrastes máximos

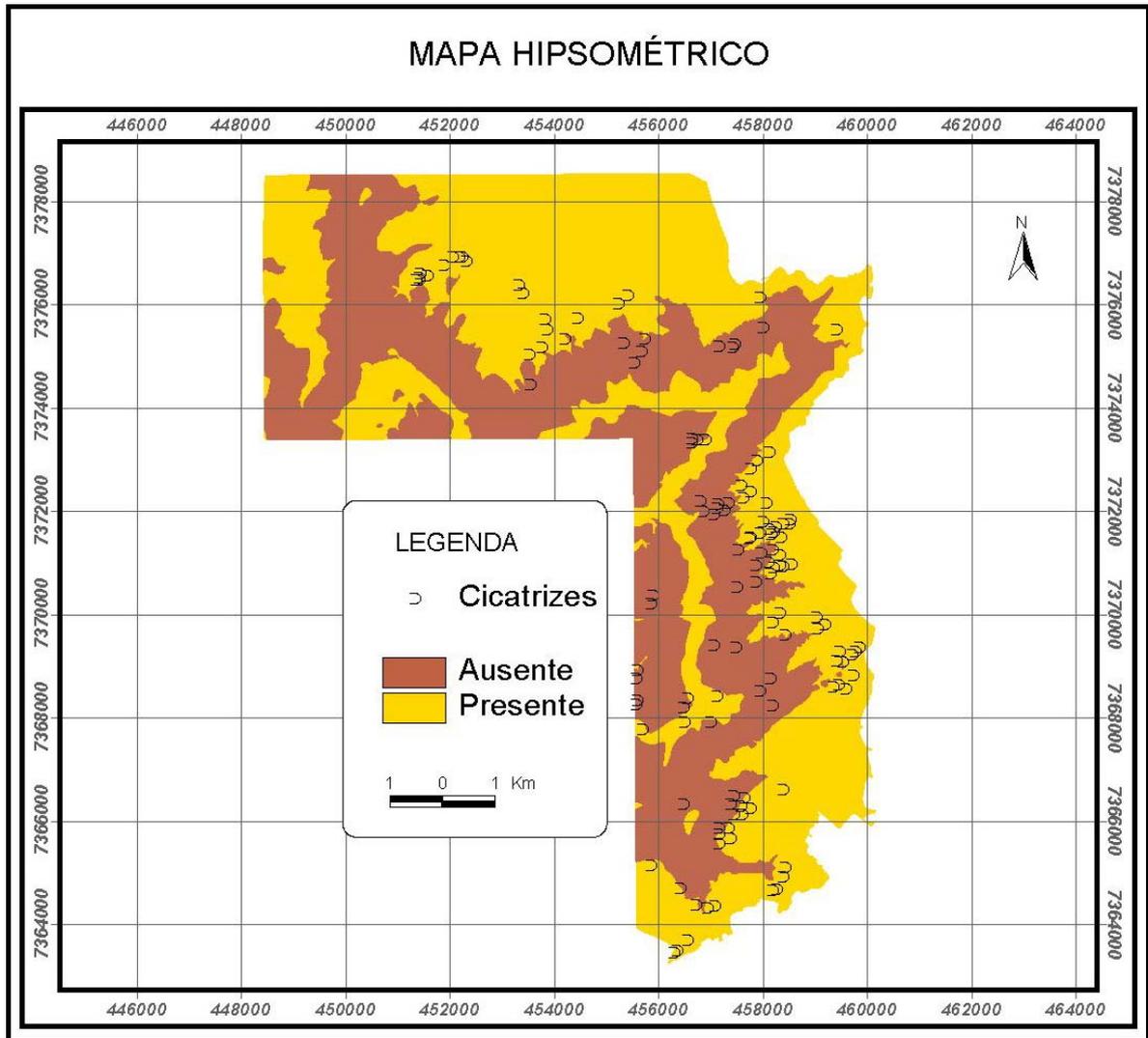


Figura 5.13 – Padrão binário de evidências para a evidência “mapa hipsométrico”, reclassificado de acordo com os contrastes máximos.

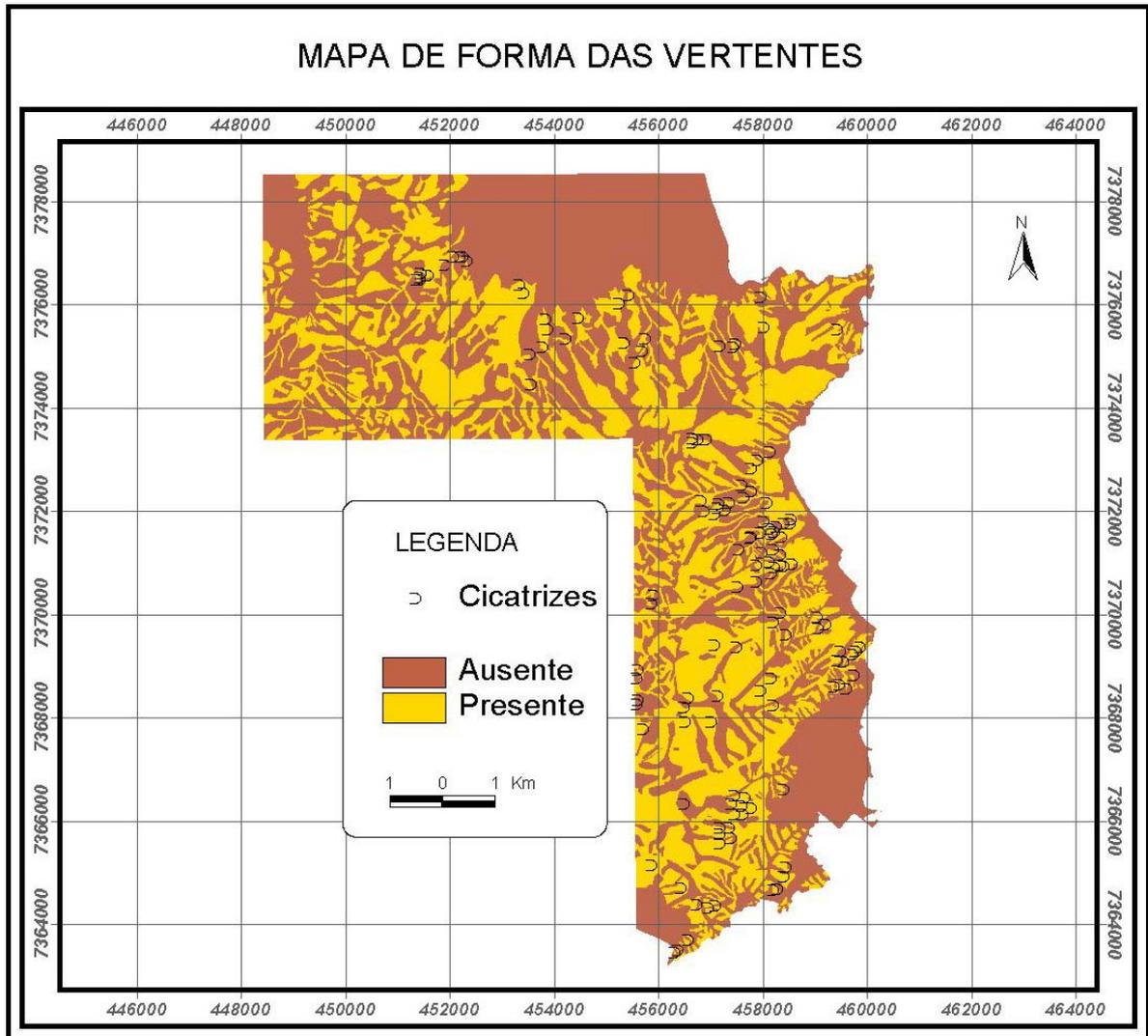


Figura 5.14 - Padrão binário de evidências para a evidência “mapa de forma das vertentes”, reclassificado de acordo com os contrastes máximos.

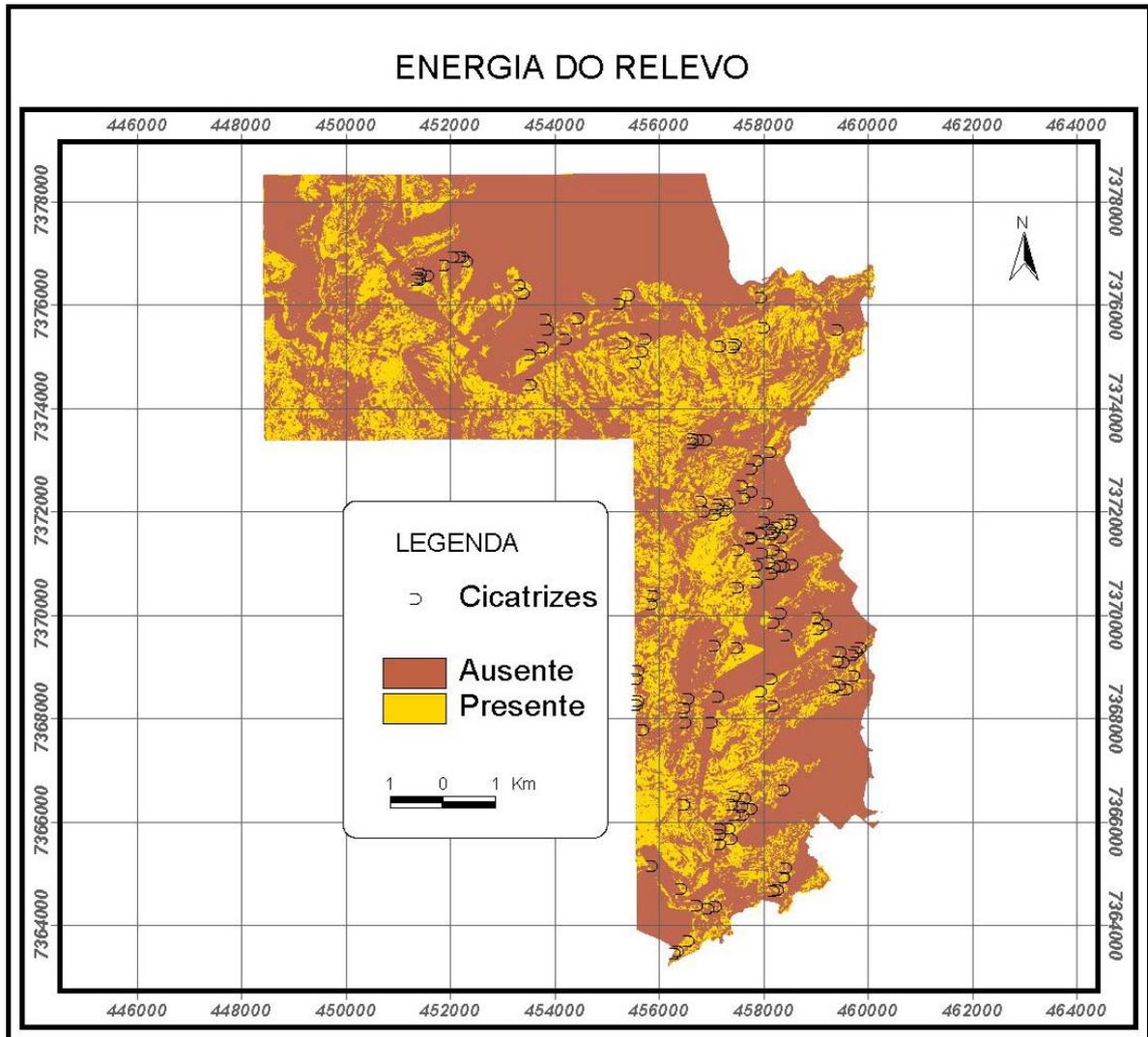


Figura 5.15 – Padrão binário de evidências para o tema mapa de energia do relevo reclassificado de acordo com os contrastes máximos.

5.1.2.3 Avaliação da independência condicional considerando declividade e excluindo a carta de energia do relevo.

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, se houve, em que grau isso ocorreu afim de que fossem feitos os devidos ajustes para proceder-se uma nova modelagem. A Tabelas 5.9 mostra os resultados da aplicação do teste pareado.

Tabela 5.9 – Resultados do teste Qui-quadrado (pareado) aplicado sobre os temas utilizados na análise, considerando a declividade.

TEMA	Geomorfologia	Vegetação	Declividade	Exposição	Hipsométrico	F. da vertente
Litologias	2,30	0,53	0,01	0,00	3,68	0,04
Geomorfologia		3,64	0,73	2,91	3,30	2,47
Vegetação			1,46	0,30	5,29	1,16
Declividade				0,01	0,29	0,48
Exposição					0,94	0,47
Hipsométrico						0,03

Examinando-se a Tabela 5.9, 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 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 de independência condicional. Esse número com valor acima do tabelado deve ser visto com cautela. Os resultados apresentados não demonstram que houve acentuada violação da independência condicional, logo a modelagem para geração do mapa final de suscetibilidade pode ser realizada sem necessidade de ajustes.

5.1.2.4 Avaliação da independência condicional considerando energia do relevo e excluindo a declividade.

A aplicação do teste qui-quadrado (pareado) para checagem da independência condicional entre as evidências, incluindo a carta de energia do relevo e excluindo o mapa de declividade, resultou na Tabela 5. 10.

Tabela 5.10 - Resultados do teste qui-quadrado (pareado) aplicado sobre os temas utilizados na análise, considerando a energia do relevo.

TEMA	Geomorfologia	Vegetação	Exposição	Energia	Hipsométrico	F. da vertente
Litologias	2,30	0,53	0,00	0,11	3,68	0,04
Geomorfologia		3,64	2,91	0,69	3,30	2,47
Vegetação			0,30	0,02	5,29	1,16
Exposição				0,06	0,94	0,47
Energia					0,39	0,57
Hipsométrico						0,03

Fazendo um exame dos resultados exibidos nas tabelas acima, pode-se dizer que considerando 1 grau de liberdade, e um nível de significância de 98% todos os valores da Tabela 5.14 apresentam valores inferiores ao valor do qui-quadrado tabelado que é de 5.4, o que significa que a hipótese nula da independência condicional a esse nível não pode se rejeitada. Considerando-se agora um nível de significância de 95%, o resultado é idêntico ao obtido com o mapa de declividade, ou seja, existe um valor acima do teste qui-quadrado tabelado que é 3,8. Apesar de reconhecer que esse valor deve ser visto com cautela, optou-se por tornar a análise mais flexível, e não fazer nenhum ajuste no mapa que apresenta esse valor nos dois casos, e proceder à modelagem para obtenção do mapa final de probabilidades e examinar posteriormente o resultado do teste global. Como observou muito bem Bonham-Carter (1984), na prática é muito difícil que as evidências sejam totalmente independentes, de forma que uma certa dependência sempre ocorre na natureza.

Alguns fatores contribuem diretamente para isso, como fontes de dados primários gerados em escalas diferentes, fato que pode realçar determinadas características em um tema e mascarar outras que são importantes em outros temas. Como exemplo, pode citar um mapa geológico em uma escala de menor detalhe, onde são geradas unidades com grande extensão em área, devido ao pequeno detalhamento, o que certamente vai ser refletido no cálculo do contraste, pois há grande chance de se encontrar muitos eventos em áreas extensas. Por outro lado, numa escala de detalhe, a densidade média dos eventos por unidade seria bem menor, logicamente, pois se teria uma série de pequenas unidades, que não concentrariam, por si só, tantos eventos. Quando há possibilidade de combinações

com outro tema, esse problema pode ser facilmente resolvido, contudo em algumas situações não é possível fazer ajustes antes da modelagem, sob pena de não se levar em conta dados importantes, e eliminar um determinado tema, o que dependendo da sua importância no processo, também torna-se inviável.

5.1.2.5 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, no caso considerando a declividade e excluindo a energia do relevo. (Tabela 5.11). 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 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 os mapas.

Tabela 5.11 - 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, ponderado com declividade.

EVIDÊNCIAS	W+	W-	CONTRASTE (C)	CONFIANÇA C/s(C)
Litologias	-0,7801	0,5206	1,3007	6,4954
Geomorfologia	-1,2070	0,6244	1,8314	7,8091
Vegetação	-0,5813	0,5393	1,1206	6,0863
Declividade	-0,2117	0,4964	0,7081	3,9098
Exposição	-0,1794	0,3268	0,5062	2,8431
Hipsometria	-0,3865	0,3099	0,6964	3,8220
Forma das vertentes	-1,4121	0,7287	2,1408	8,5977

Os valores mais elevados de contraste foram 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 mapa hipsométrico foi a que menos contribuiu para o mapa final, tendo, portanto assim uma importância secundária, assim como o mapa de exposição de vertentes. Com relação ao grau de confiança, de uma maneira geral, os mapas com maiores contrastes também apresentam os mais elevados graus de confiabilidade, pois os maiores valores correspondem justamente à forma da vertente e geomorfologia. Com relação à vegetação e litologia houve uma inversão, ou seja, o que apresentou maior contraste apresentou menor grau de confiança na análise, mas foi a única exceção.

Para o caso em que se considera a energia do relevo e se descarta o mapa de declividade, os resultados dos cálculos dos ponderadores são mostrados na Tabela 5.12. As colunas representam os mesmos parâmetros mostrados na Tabela 5.11.

Tabela 5.12 - 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, ponderado com energia do relevo.

EVIDÊNCIAS	W+	W-	CONTRASTE (C)	CONFIANÇA C/s(C)
Litologias	-0,7801	0,5206	1,3007	6,4954
Geomorfologia	-1,2070	0,6244	1,8314	7,8091
Vegetação	-0,5813	0,5393	1,1206	6,0863
Exposição	-0,1794	0,3268	0,5062	2,8431
Energia do relevo	-0,3965	0,4368	0,8333	4,6951
Hipsometria	-0,3865	0,3099	0,6964	3,8220
Forma das vertentes	-1,4121	0,7287	2,1408	8,5977

Os resultados mostram a evidência forma da vertente como tendo a maior contribuição para o mapa de suscetibilidade, seguido pelas evidências geomorfologia, litologia, vegetação, exposição das vertentes e energia do relevo. A evidência mapa hipsométrico foi a que menos contribuiu com o resultado final.

Os resultados são idênticos quando se considera declividade e energia do relevo, sendo que o primeiro apresentou uma maior contribuição em termos relativos. Quanto ao grau de confiança, os mapas com maiores valores de contraste também aparecem com um maior grau de confiança, como também aconteceu no caso anterior.

As figuras 5.20 e 5.21 mostram os mapas de suscetibilidade a escorregamentos, baseados na distribuição final da probabilidade posterior, estimada pelo método “pesos de evidência”(WOFE). O primeiro mapa representa o resultado da modelagem de mapas binários, considerando a declividade e o segundo representa o mapa estimado a partir de padrões binários, descartando a declividade e considerando a energia do relevo.

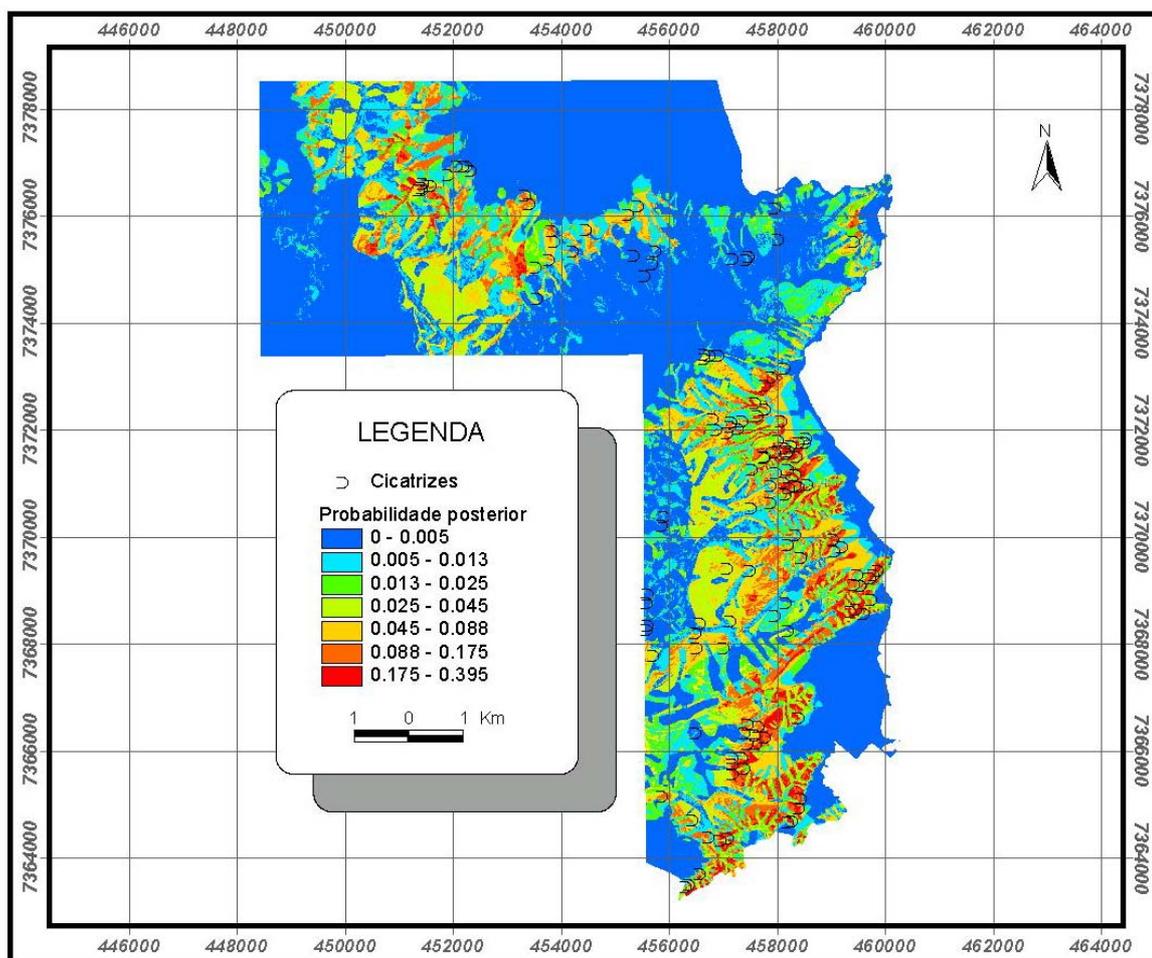


Figura 5.16 – Mapa de suscetibilidade a escorregamentos, obtido através da modelagem WOFE, considerando o mapa de declividade.

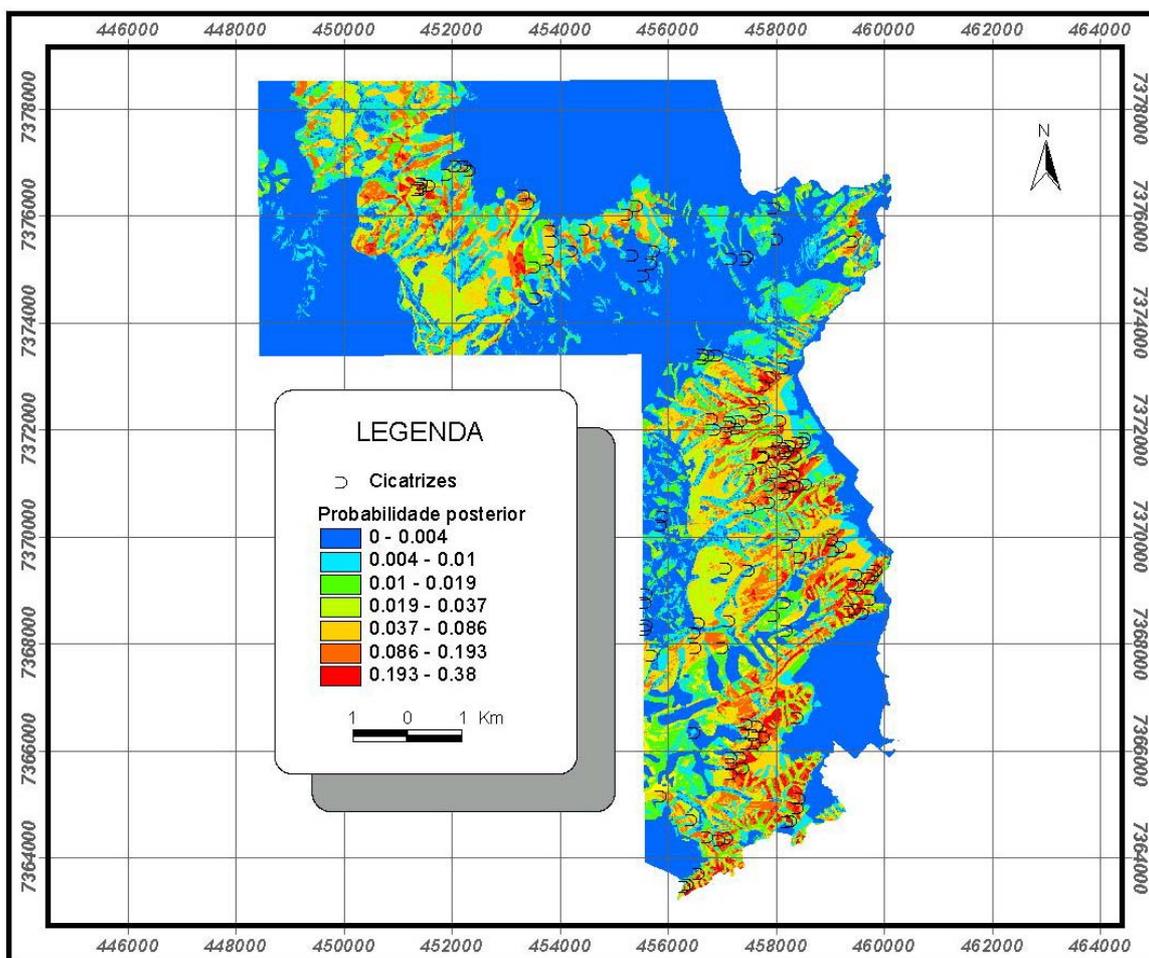


Figura 5.17 – Mapa de suscetibilidade a escorregamentos obtido através da modelagem WOFI, considerando a carta de energia do relevo

Analisando-se os mapas mostrados acima, pode-se observar que existe uma grande semelhança entre os dois, apesar de terem sido modelados utilizando-se a evidência mapa de declividade no caso da Figura 5.16, e a evidência carta de energia do relevo, no caso da Figura 5.17. Para o mapa que considerou a declividade, 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. No segundo mapa esse valor não é muito diferente, pois nas áreas com maior suscetibilidade, o valor de probabilidade é cerca de 20 vezes a densidade média, o que comprova a similaridade entre os mapas, causada pela similaridade entre as duas evidências consideradas.

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, que são as áreas marcadas em azul em ambos os mapas, o que reforça a validade do método.

5.1.2.6 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 nos itens 5.1.3.3 e 5.1.3.4. 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 (1984), 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.

Para o mapa que utilizou a evidência declividade, 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. Para o mapa modelado com a evidência “energia do relevo, o índice calculado através desse teste, retornou um razão de 0,81, significando que foram prognosticados cerca de 164 eventos de escorregamentos, portanto 31 a mais do que o número de eventos mapeados, o que também comprova que não houve acentuada violação da independência condicional como já havia sido demonstrado pelo teste qui-quadrado.

Quanto ao grau de incerteza da modelagem, para produção dos mapas de suscetibilidade, as Figuras 5.18 e 5.19 apresentam os resultados obtidos pela divisão do mapa de probabilidade posterior pelo seu desvio padrão devido às incertezas totais, como descrito antes. A Figura 5.18 representa o resultado da modelagem considerando o mapa de declividade, enquanto a Figura 5.19 considera a carta de energia do relevo.

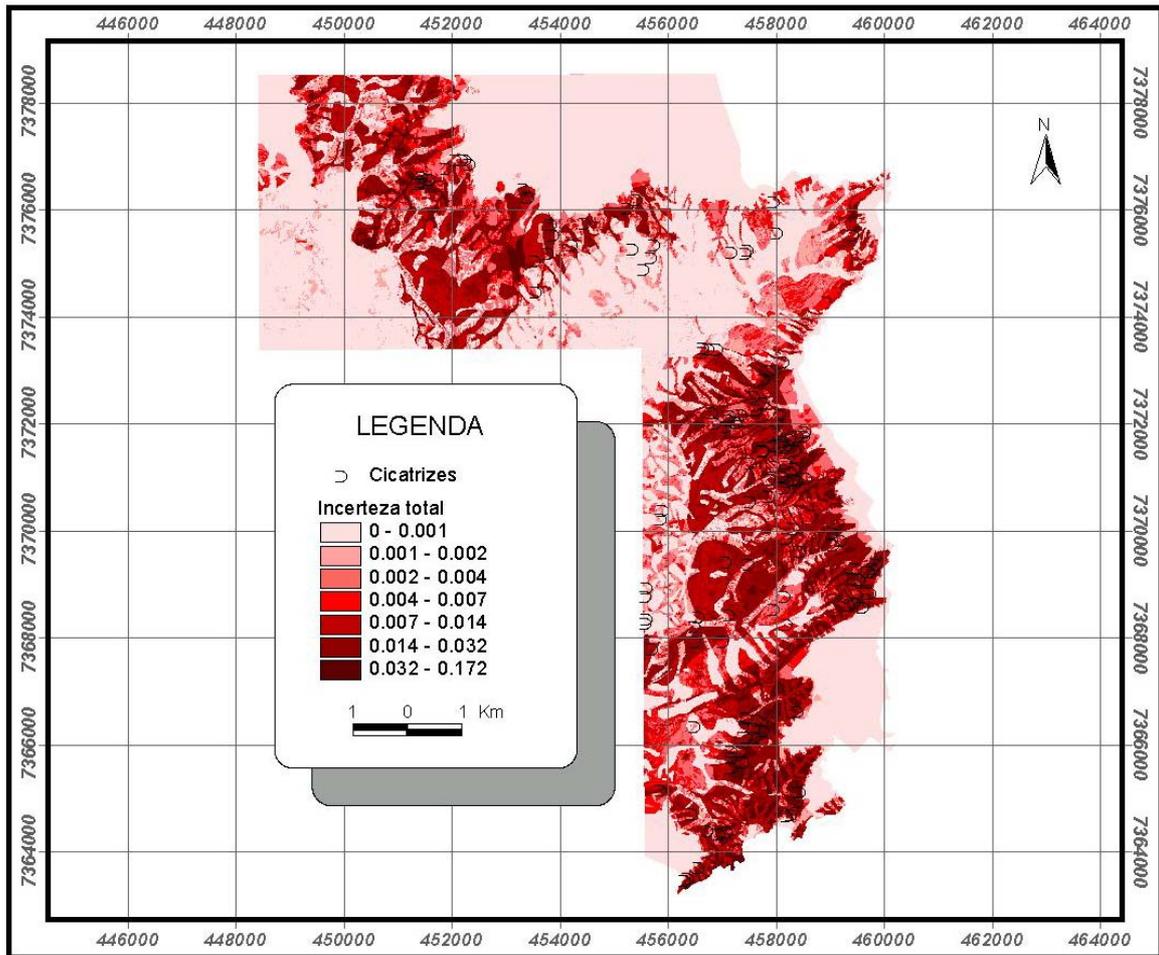


Figura 5.18 – Mapa de avaliação do grau de incerteza total da modelagem WOFE, considerando o mapa de declividade. As áreas mais saturadas em vermelho representam as maiores incertezas.

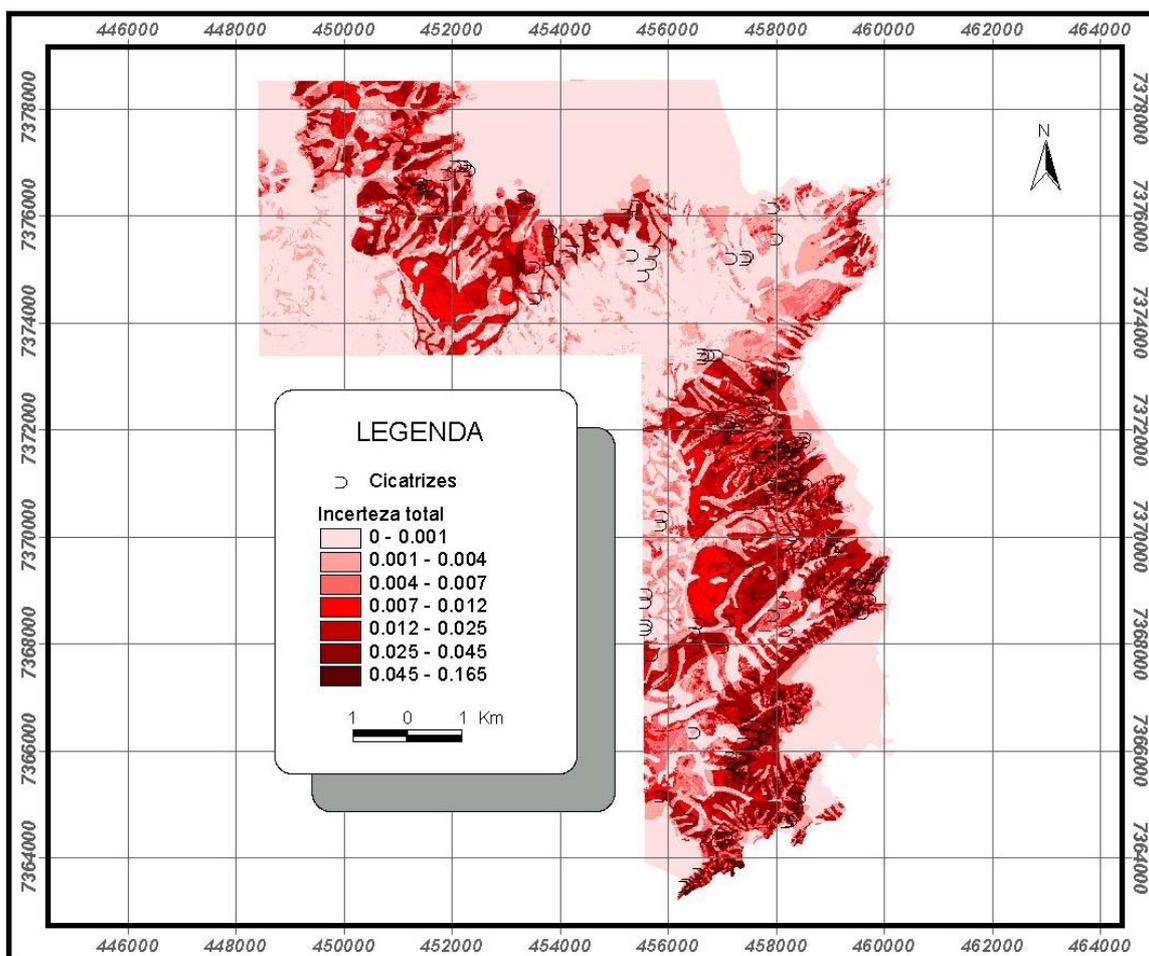


Figura 5.19 – Mapa de avaliação do grau de incerteza total da modelagem WOFE, considerando a carta de energia do relevo. As áreas mais saturadas em vermelho representam as maiores incertezas.

Os resultados mostrados nesses mapas 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, como pode ser confirmado na Figura 5.20, que mostra uma comparação entre esses dois parâmetros para as Figuras 5.16 e 5.18. A modelagem utilizando a evidência “mapa de declividade” mostra menor grau de incerteza em relação à modelagem que utilizou a evidência “carta de energia do relevo”.

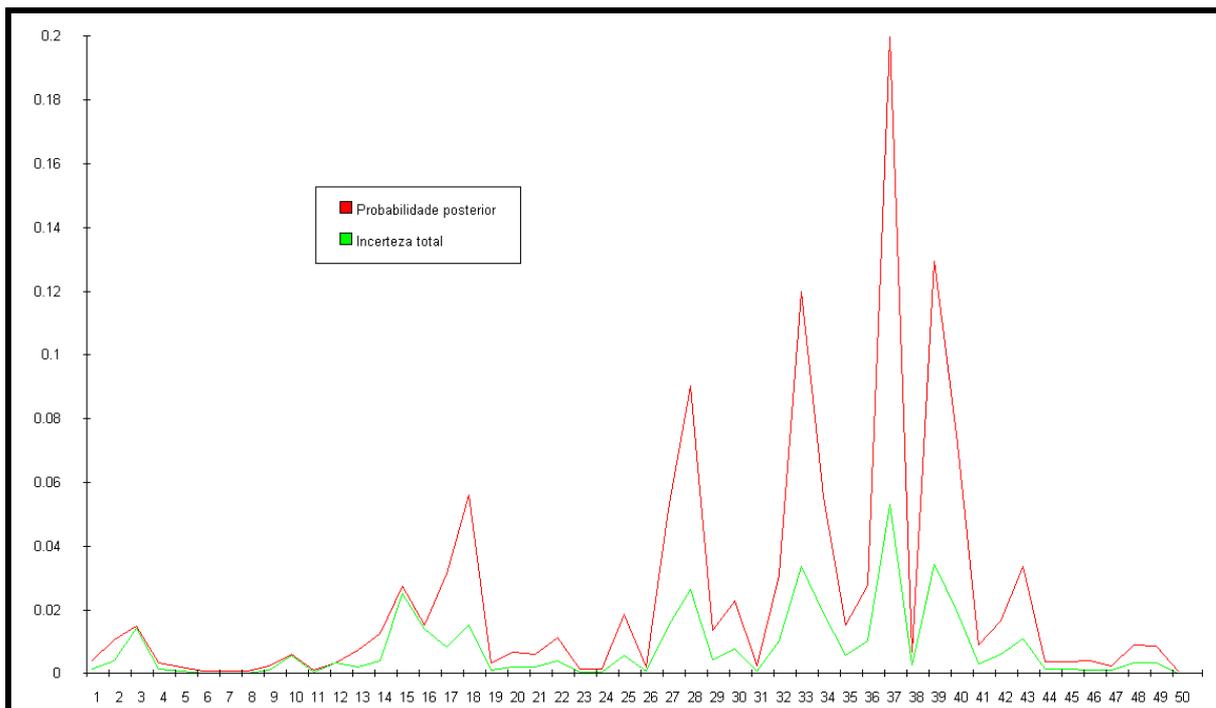


Figura 5.20 – Comparação entre a variação da probabilidade posterior e a variação do grau de incerteza total para alguns dos parâmetros gerados com a modelagem que originou o mapa de suscetibilidade, mostrado na Figura 5.16 e o mapa de incerteza total mostrado na Figura 5.18.

5.1.2.7 Considerações sobre a resolução espacial do mapa de escorregamentos

A modelagem WOFE pressupõe que todos os eventos, no caso os escorregamentos, possuem a mesma extensão em área, uma vez que todo cálculo dos pesos de evidências e das probabilidades a priori e a posteriori são efetuados levando em conta essa relação, a escolha do tamanho da célula que representa o evento é muito importante. Essa escolha tem que ser coerente com o que está ocorrendo na área de estudo, para que seja representativo do conjunto, pois todo cálculo dos parâmetros estatísticos acontece em função da relação entre o evento e sua densidade média dentro da área de estudo, de forma que todas as relações são algébricas.

A Tabela 5.13 mostra os valores de probabilidade a priori e os valores do desvio padrão do cálculo dessa probabilidade para os pontos da área em função de diferentes valores para a célula do escorregamento.

Tabela 5.13 - Relação entre o tamanho da célula que representa o evento e os valores calculados da probabilidade a priori e do desvio padrão.

TAMANHO DA CÉLULA (Km²)	PROBABILIDADE A PRIORI	DESVIO PADRÃO
0.01	0.0197	0.0016
0.02	0.0394	0.0032
0.03	0.0591	0.0048
0.04	0.0788	0.0063
0.05	0.0985	0.0078
TOTAL DE PONTOS	133	
ÁREA TOTAL	72.1052	

Como pode ser visto na tabela, o tamanho da unidade influi diretamente no cálculo da probabilidade, pois quanto maior for o tamanho da célula, maior será o valor calculado da probabilidade a priori, e logicamente a relação contrária também é verdadeira.

A escolha da resolução tanto pode ser realizada subjetivamente a partir do julgamento do especialista levando-se em conta uma medida que seja representativa do todo, como através de uma equação matemática que reflita essas relações. Para este trabalho adotou-se o valor de 0.01Km² para o tamanho da célula que representa os escorregamentos, seguindo sugestão de Kemp *et al* (2001) que apresenta uma fórmula para a escolha dessa resolução, que é:

$$\text{Valor sugerido} = (\text{área total de estudo} / \text{total de pontos de treinamento}) / 40$$

Uma outra condição importante é que os pontos estejam colocados na sua posição exata no mapa, como o modelo é baseado nos dados, logicamente ele considera as relações locais e é comum a imprecisão de mapas topográficos, erros por ocasião da transferência de dados de fotografias aéreas, etc.

5.2 AVALIANDO O CRESCIMENTO URBANO DO MUNICÍPIO

5.2.1 Área urbana em 1977

A área urbana do Município de São Sebastião em 1977 é mostrada na Figura 5.21 Nesta figura pode-se observar que a ocupação começou na planície litorânea e foi se expandindo em direção as encostas da Serra do Mar. Nessa época, a região já apresentava um processo intenso de ocupação associado a construção da rodovia Rio – Santos. Além disso, a área já dispunha de infraestrutura portuária e contava também com o terminal petrolífero, o que proporcionava condições atrativas de mercado de trabalho e, conseqüentemente, favoreceu o aumento da população.

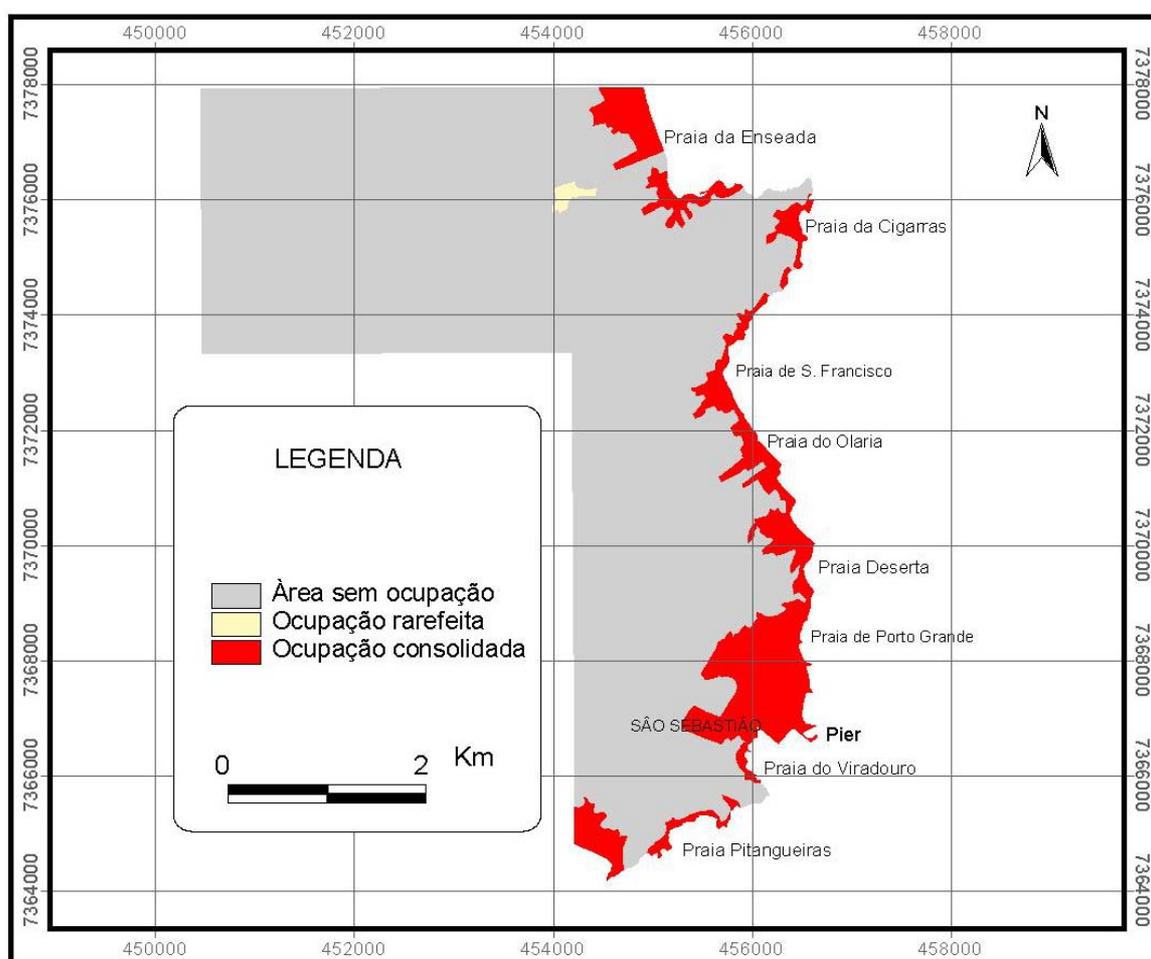


Figura 5.21 – Ocupação urbana no ano de 1977, obtida da interpretação visual de fotografias aéreas na escala 1:10.000

5.2.2 Área urbana em 1988

Entre os anos de 1977 e 1988, registrou-se um período de grande crescimento econômico da região, impulsionado pela expansão da infra-estrutura, marcada pela abertura de estradas e, principalmente, com a descoberta da área como destino turístico, o que teve reflexos na expansão urbana. Conseqüentemente, áreas que já eram ocupadas expandiram-se em direção às encostas íngremes da Serra do Mar, as quais funcionaram como uma barreira natural a uma ocupação ainda mais acentuada.

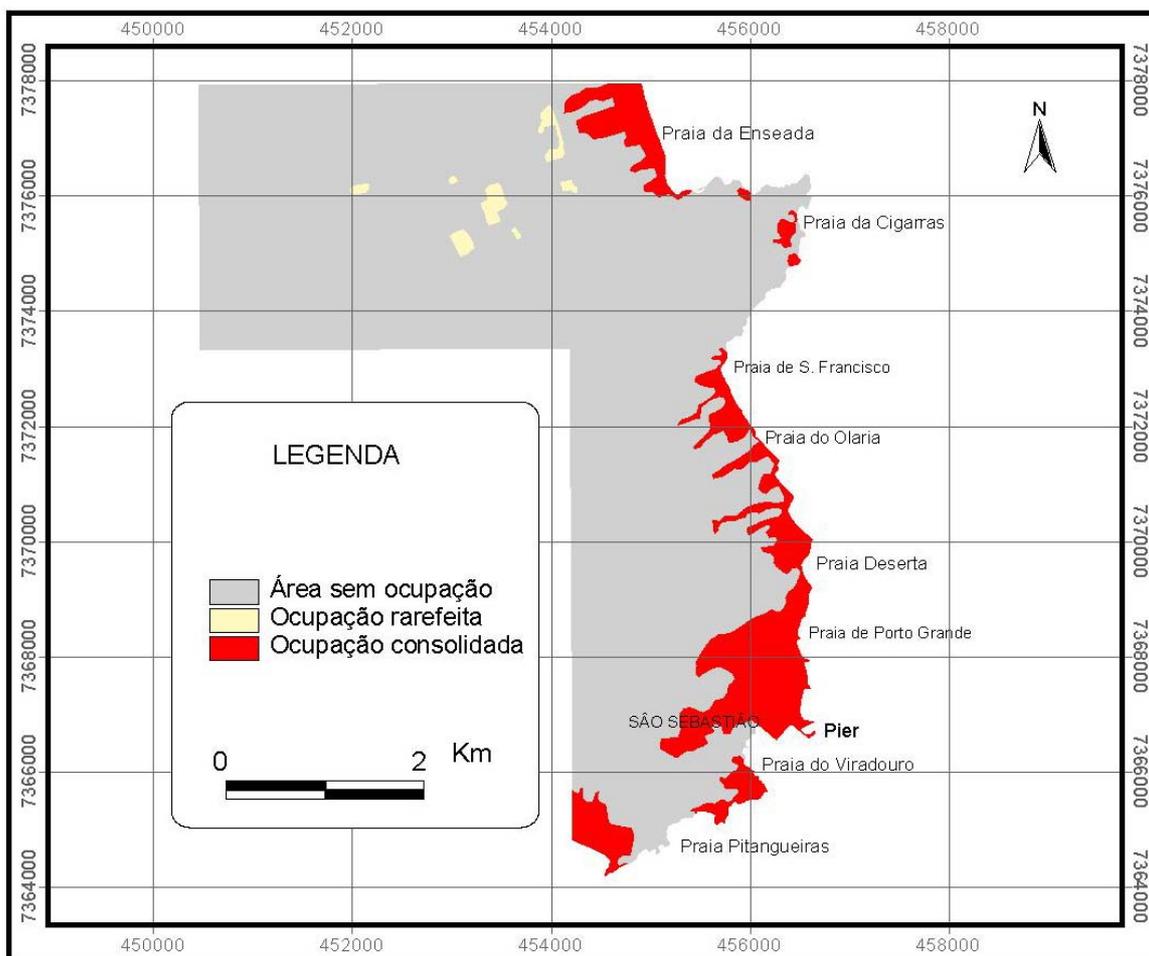


Figura 5.22 – Ocupação urbana no ano de 1988, obtida da interpretação visual de imagem de satélite TM LANDSAT 5

5.2.3 Área urbana em 2000

A tendência de expansão verificada entre os anos de 1977 e 1988 continuou a acontecer até o ano 2000, como mostra o mapa da Figura 5.23. A expansão urbana aconteceu basicamente segundo as mesmas direções só que, como pode ser observado, com maior velocidade, especialmente na porção mais a oeste, no limite com o município de Caraguatatuba, e essa é uma tendência que deve continuar nos próximos anos, em virtude dessa área apresentar um maior potencial de ocupação, em função das características do relevo, enquanto na direção sul praticamente não existe mais espaço entre as áreas já ocupadas e as escarpas da Serra do Mar.

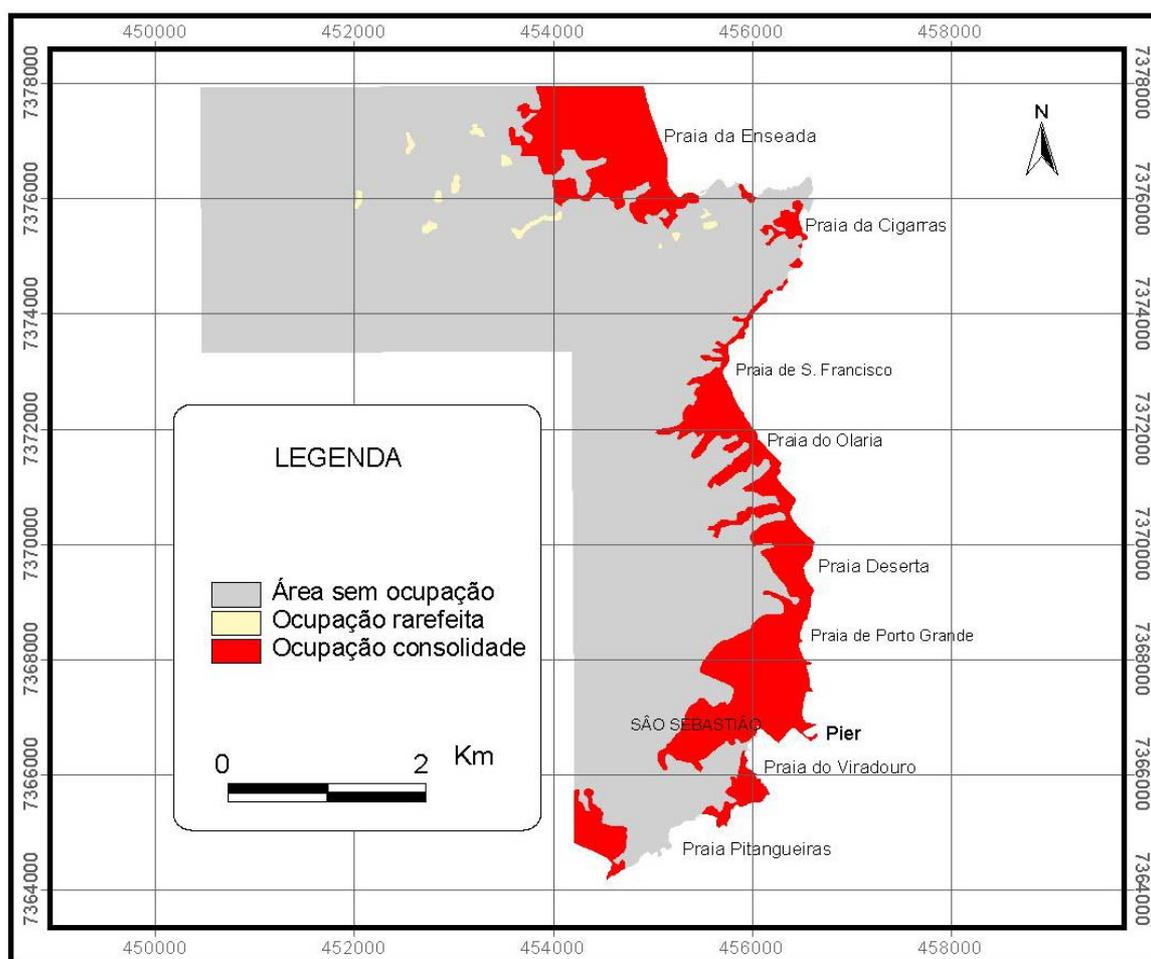


Figura 5.23 – Ocupação urbana no ano de 2000, obtida da interpretação visual de imagens de satélite LANDSAT 7 ETM+

Certamente, a cidade de São Sebastião cresceu em direção às encostas da Serra do Mar, como mostra a evolução das três datas analisadas, contudo esse crescimento não é tão significativo em termos territoriais. O crescimento urbano, que acontece com taxa de cerca de 7% ao ano, segundo dados da prefeitura, está associado ao aumento de populações nas áreas onde já existe ocupação, ou seja, a densidade está aumentando mais do que a própria expansão territorial, apesar de terem surgido muitas áreas com ocupação irregular, como é o caso do Bairro Topolândia, surgido devido a falta de espaço para instalação de moradias.

Verifica-se também que há uma clara tendência à ocupação na parte norte da área, no limite com o município de Caraguatatuba, em uma região que é a continuação da planície de Caraguatatuba, no Bairro Jaraguá. Essa é uma área que ainda apresenta potencial de ocupação, o que é compatível com o relevo de boa parte da região, pois é uma área que apresenta uma planície mais ampla.

A maior parte da área enfocada no estudo, caracteriza-se por concentrar comércio, serviços e população local residente. Possui ainda duas obras de infra-estruturas de importância regional: a TEBAR e o porto. Na maior parte, a área apresenta forte valorização imobiliária e essa valorização é incompatível com a escassez de terras planas que sejam adequadas, com exceção de alguns locais situados próximos aos limites do município de Caraguatatuba, que têm disponibilidade de terras para ocupação e uma condição geomorfológica mais favorável.

5.2.4 Evolução da expansão urbana entre os anos de 1977 e 2000

A expansão urbana entre os anos de 1977 e 2000 na área urbana de São Sebastião, especialmente entre o centro urbano e a Costa norte, não foi tão significativa em termos territoriais, como pode ser visto nas figuras mostradas a seguir. O crescimento populacional bem mais significativo deu-se especialmente em locais de ocupação já existentes, porém rarefeitas, aumentando assim a densidade populacional.

A expansão territorial da ocupação, contudo, só não foi maior devido à existência de barreiras naturais e ao interesse crescente com questões ambientais,

surgido na década de 70 com os movimentos ambientalistas, que tem promovido o debate público e influenciado diretamente na elaboração dos planos diretores municipais e na própria política ambiental do estado como um todo, além de ter incentivado a realização de vários projetos objetivando o gerenciamento costeiro.

Nos mapas mostrados a seguir (Figuras 5.24 a 5.26), as áreas em vermelho significam as que tiveram uma ocupação consolidada ao longo de todos esses anos e mostra a tendência dos vetores de crescimento em direção ao setor norte do município, onde se situam os bairros Enseada, Divisa e Jaraguá.

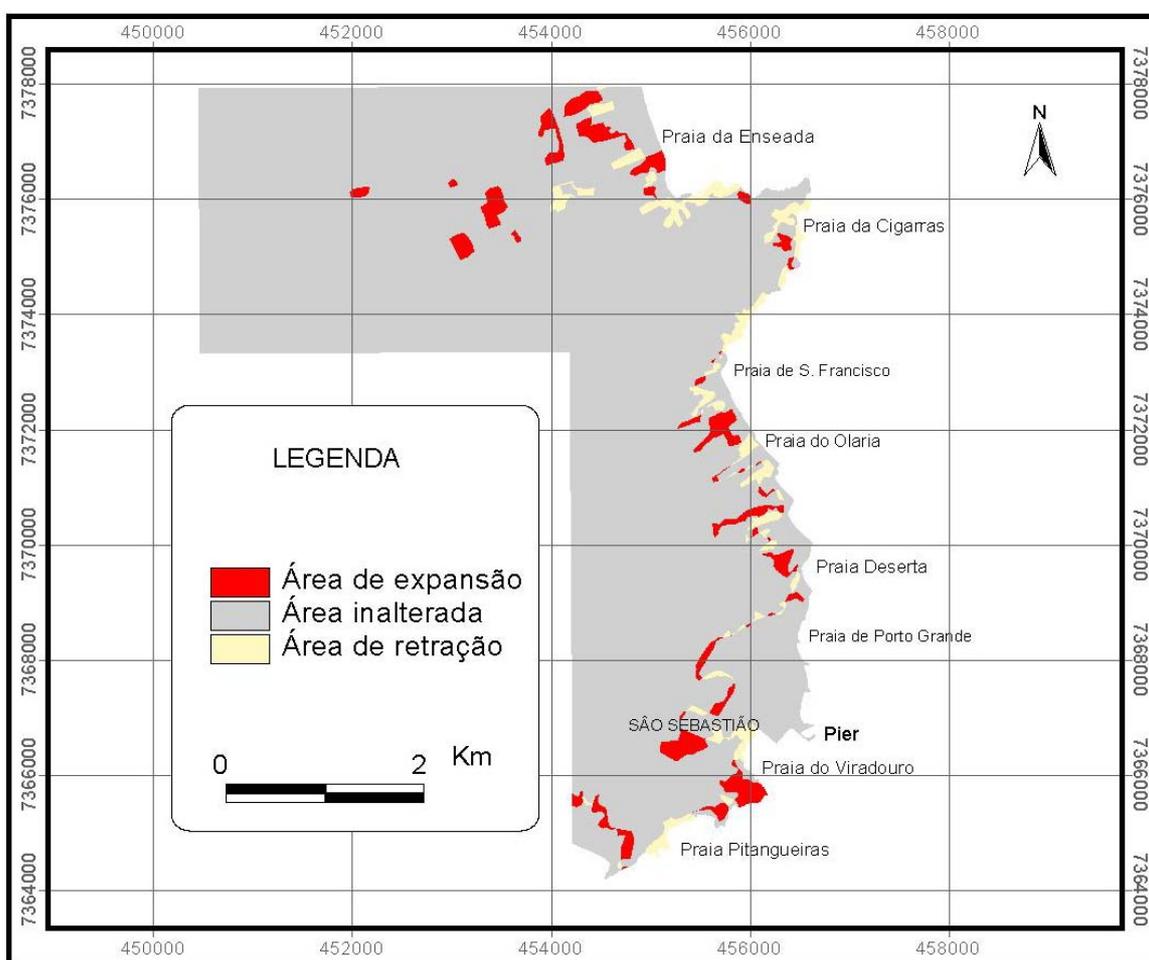


Figura 5.24 - Mapa mostrando a evolução da expansão da ocupação urbana entre os anos de 1977 e 1988. Em vermelho estão representadas as áreas expandidas, em amarelo são aquelas onde existiam sinais de ocupação, mas que desapareceram e cinza as que permaneceram inalteradas.

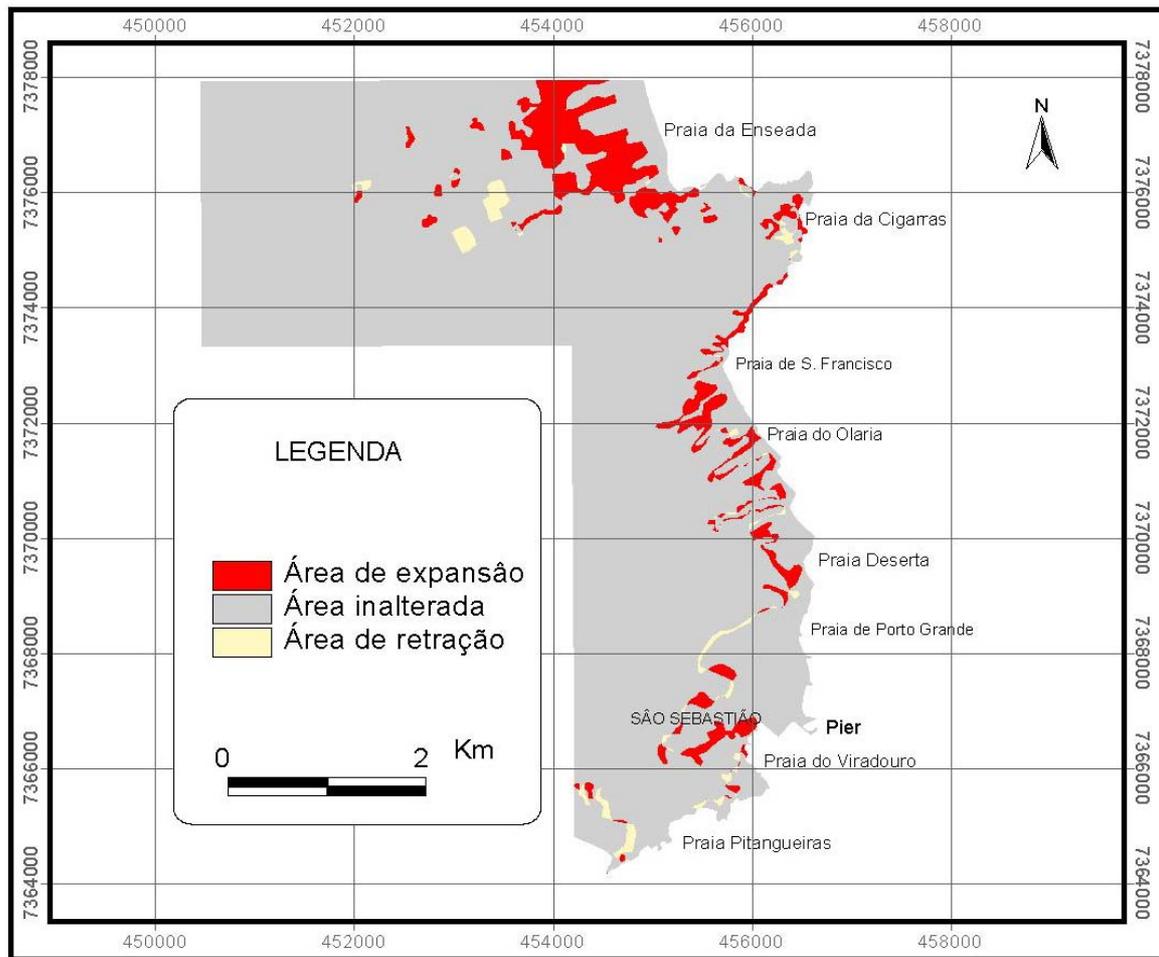


Figura 5.25 – Mapa mostrando a evolução da expansão da ocupação urbana entre os anos de 1988 e 2000. Em vermelho estão representadas as áreas expandidas, em amarelo são aquelas onde existiam sinais de ocupação, mas que desapareceram e cinza as que permaneceram inalteradas.

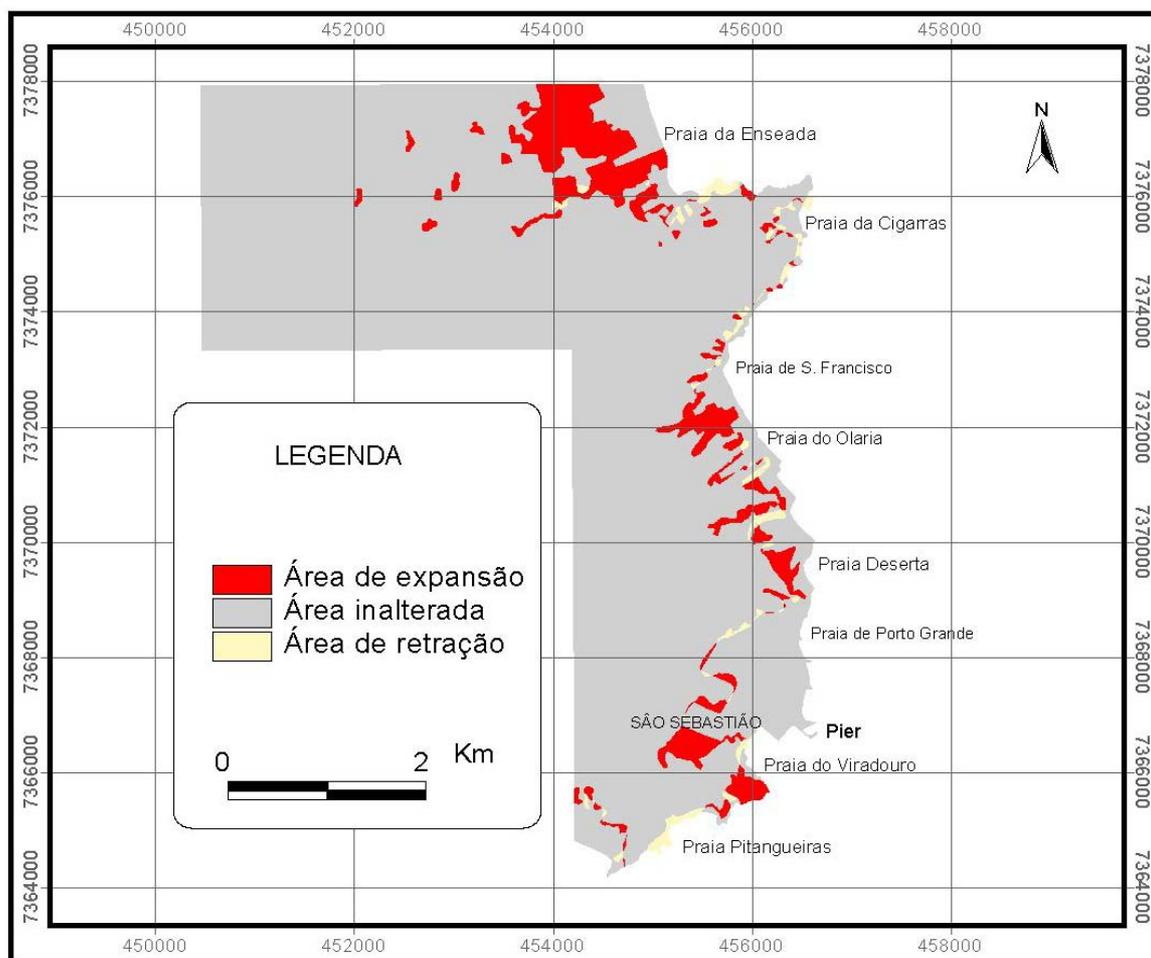


Figura 5.26 – Mapa mostrando a evolução da expansão da ocupação urbana entre os anos de 1977 e 2000. Em vermelho estão representadas as áreas expandidas, em amarelo são aquelas onde existiam sinais de ocupação, mas que desapareceram e cinza as que permaneceram inalteradas.

Confrontando-se o mapa mostrado na Figura 5.23, referente à área de expansão urbana do ano de 2000, com o mapa de registro de escorregamentos, pode-se verificar que existem áreas onde a ocupação já está bastante consolidada, e com registros de escorregamentos o que sugere uma situação de risco, uma vez que o processo já está instalado. Isso pode ser verificado especialmente onde a mancha urbana ocupa uma faixa mais extensa, na parte sudeste da área, que é exatamente o centro da cidade de São Sebastião. Esse local especificamente cresceu muito em função da ocupação irregular das encostas pela população de baixa renda. A área mais ao norte, como já foi discutido anteriormente, apresenta a situação menos preocupante, por ter uma faixa extensa de área plana, mas em

direção às encostas também já se verifica a presença de escorregamentos.

Por outro lado, existem também vários registros de escorregamentos fora da área urbana e vários também próximos de áreas em processo de expansão ou adensamento, o que configuraria risco potencial.

A comparação entre o mapa de suscetibilidade a escorregamentos e o mapa com a mancha é apenas ilustrativa, não tendo nenhuma pretensão de apresentar um mapa de risco no sentido exato do termo.. Pretendeu-se apenas fornecer indicações das áreas de risco já instalado e potencial, a primeira situação correspondendo às áreas de sobreposição entre os eventos ocorridos e a área urbana, mostrada na Figura 5.27, e a de risco potencial, que corresponderia àquelas áreas de maior probabilidade de instalação dos processos, mostrada nos mapas de suscetibilidade produzidos, que ainda não foram ocupadas, mas que poderiam vir a ser, segundo as direções constatadas de crescimento potencial da ocupação.

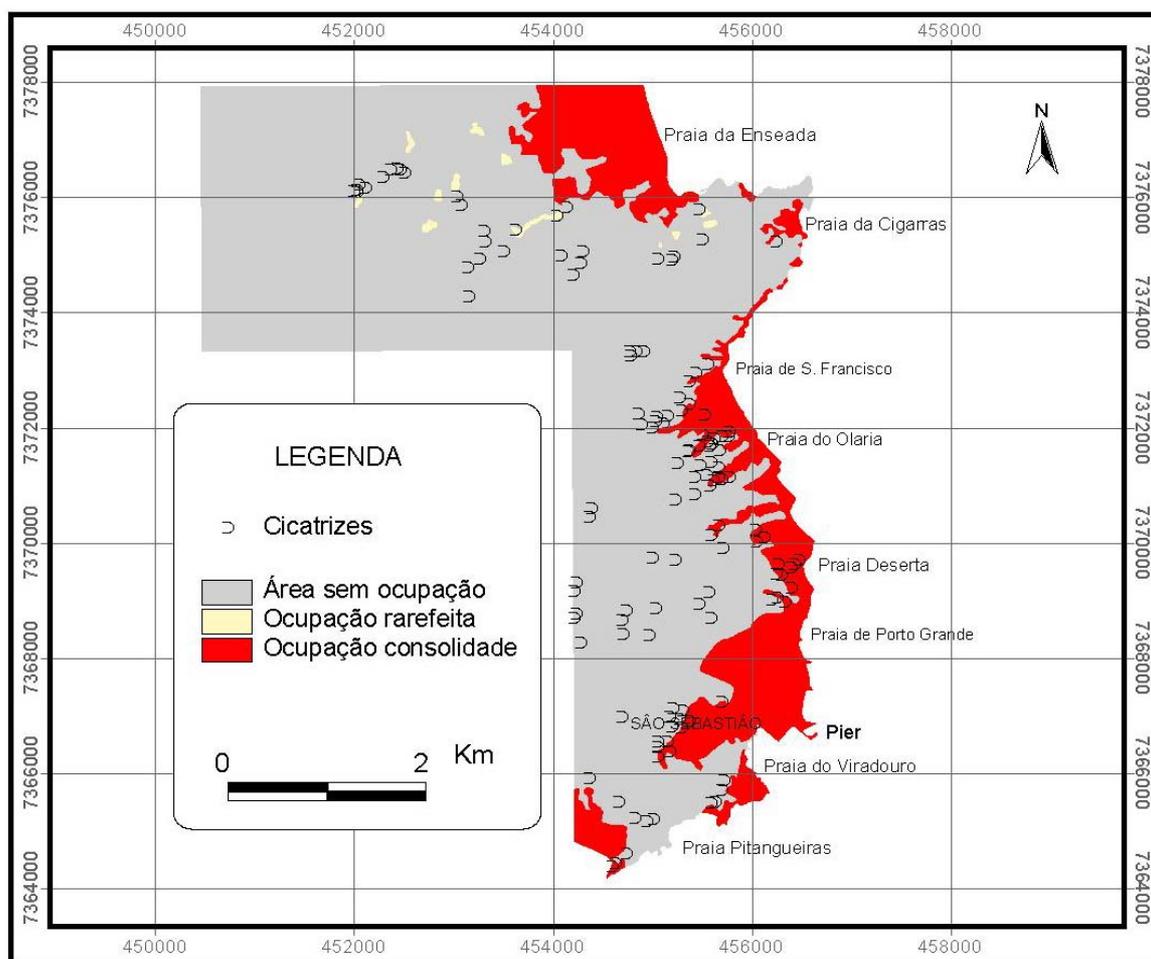


Figura 5.27 – Relação entre os escorregamentos e a área urbana no ano de 2000.

6. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos permitiram as seguintes conclusões, com relação à problemática estudada e ao método utilizado:

Com relação aos condicionantes utilizados na modelagem, os valores de contraste, que é a medida estatística da correlação espacial entre os condicionantes e os eventos, considerando-se tanto a situação que utiliza a energia do relevo na modelagem, como a situação onde somente a declividade é utilizada, obedeceram à seguinte ordem decrescente de importância: forma das vertentes, seguido das evidências geomorfologia, vegetação, litologias e declividade ou energia do relevo, dependendo do caso, hipsometria e, finalmente exposição das vertentes.

Os mapas finais de suscetibilidade produzidos apresentaram valores muito próximos de probabilidade posterior para as duas situações de modelagem, com a energia do relevo e com a declividade, o que permite concluir que neste caso, especificamente, poderia ter sido utilizado somente o condicionante declividade, sem prejuízos para a análise.

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.

Com relação aos eventos prognosticados pelo método aplicado, obteve-se nas duas situações, com declividade e com energia do relevo, valores de **171** e **164** eventos prognosticados, respectivamente, de onde se conclui que a aplicação do método sobre padrões binários gera resultados coerentes e confiáveis, uma vez que esses valores não mostram uma discrepância em relação aos eventos mapeados, que são **133** no total. Contudo, deve-se verificar que estão a muito próximos do limite de 15% acima do número utilizado para o cálculo da probabilidade a priori. As áreas com maiores valores de probabilidades apresentam um número 21 e 20 vezes maior do que a densidade média dos eventos, medida pela probabilidade a priori, para a modelagem com declividade e energia do relevo, respectivamente.

A partir dos mapas de suscetibilidade gerados, que mostram 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.

Comparando-se o mapa de ocupação de áreas urbanas no ano de 2000 com o de registros de escorregamentos e com os mapas de suscetibilidade produzidos, verifica-se que existem processos instalados em áreas povoadas, constituindo situação de risco e que há outras áreas ocupadas muito próximas a regiões com elevados valores de probabilidade posterior, constituindo-se em áreas de risco potencial.

Assim, a modelagem baseada no método Bayesiano, utilizado no presente trabalho, permite que se façam algumas considerações importantes, que comprovam o seu potencial de aplicação:

1. Trata-se de um modelo objetivo, que parte das próprias ocorrências para gerar resultados e estimar as probabilidades;
2. 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.
3. 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. Dessa forma, oferece a possibilidade de resposta a algumas indagações, quais sejam:
 - Que fatores controlam os escorregamentos em uma determinada área de interesse?
 - Chegando-se à conclusão de quais fatores controlam os escorregamentos, 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?

Os métodos inferenciais podem fornecer ferramentas que permitem uma maior compreensão dos processos naturais, especialmente quando não se tem condições de utilizar medidas diretas, bem mais caras e dispendiosas e, muitas vezes, inviáveis. Não se pretende dizer com isso que a aplicação de métodos

inferenciais pode substituir as medidas diretas, ao contrário, pois essas medidas podem e devem ser utilizadas para alimentar os bancos de dados e para melhorar a consistência das análises, uma vez que apenas a possibilidade de integrar grandes volumes de dados pode, sem dúvida, favorecer uma melhor compreensão dos processos geodinâmicos .

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 muito importantes, muito embora se possa pensar que estão incluídos implicitamente na análise, erros de posicionamento e transferência de dados que influem na posição dos eventos, conclui-se que o objetivo do trabalho foi alcançado e hipótese de trabalho foi comprovada.

Os resultados obtidos demonstram que uma 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 de riscos associados a escorregamentos, 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 risco potencial.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGTERBERG, F. P. Computer programs for mineral exploration. **Science.**, v. 245, p. 76-81, 1989.

AGTERBERG, F.P. Systematic approach to dealing with uncertainty of geoscience information in mineral exploration. In: SYMPOSIUM ON APPLICATIONS OF COMPUTERS AND OPERATIONS RESEARCH IN THE MINERAL INDUSTRY, 21, 1989, Colorado. **Proceedings...** Colorado: Society of Mining Engineers., 1989, Cap. 18. 165-178p.

AGTERBERG, F.P., BONHAM-CARTER, G.F. and WRIGHT, D.F. Statistical Pattern Integration for Mineral Exploration. In: Gaal, G. and Merriam, D.F. (Ed.). **Computer Applications in Resource Estimation, Prediction and Assessment for Minerals and Petroleum.** Oxford: Pergamon, 1990. p. 1-21.

AGTERBERG, F.P., BONHAM-CARTER, G.F., CHENG, Q., AND WRIGHT, D.F., Weights of Evidence Modeling and Weighted Logistic Regression for Mineral Potential Mapping: In: Davis, J.C. and Herzfeld, U.C. (Eds.). **Computers in Geology-25 Years of Progress.** Oxford: University Press, International Association of Mathematical Geology Studies in Mathematical Geology, 1993. No. 5, p. 13-32.

AGUIAR, M. B., KRIELING, P. R. Elaboração gráfica de carta de classes de declividade de vertentes. **Rev. do Dep. de Geogr.**, n.3, p.9-116, 1984.

AGUIAR, R. L. **Análise do mapeamento geotécnico nos processos de gestão ambiental: bases conceituais para aplicação no Distrito federal.** 1994. 88 f. Monografia (em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, USP), São Carlos.

ANBALAGAN, R. Landslide hazard evaluation and zonation mapping in mountainous terrain. **Eng. Geol.**, 32, 269–277, 1992.

AUGUSTO, A. A .Z. Atualização carográfica da rede de drenagem e a análise morfométrica do relevo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, IX, 1998, Santos. **Anais...** Santos: INPE, 1998.

AUGUSTO FILHO, O. **Carta de riscos de escorregamentos: uma proposta metodológica e sua aplicação no município de Ilha Bela, SP.** 1994. 168f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de solos) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

AUGUSTO FILHO, O. **Carta de risco de escorregamento quantificada em ambiente de SIG como subsídio para implantação de seguros em áreas urbanas: um ensaio em Caraguatatuba (SP).** 2001. 196f. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.

AUGUSTO FILHO, O., ALBERTO, M. C. Mapas de declividade: análise dos resultados obtidos pelo método manual e utilizando SIG IDRISI e ARC/INFO. In: GISBRASIL99, 1999, Salvador. **Anais...** Salvador: GISBRASIL, 1999. CD-ROM.

AUGUSTO FILHO, O., CERRI, L. E. da S., AMENOMORI, C. J. Riscos geológicos: aspectos conceituais. In: SIMPÓSIO LATINO AMERICANO SOBRE RISCO GEOLÓGICO URBANO, 1, 1990, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABGE. 1990, p. 334-331.

AYALA, F. J., PEÑA, M. Los mapas de riesgos geológicos en la prevención y gestión de desastres naturales en España. In: ENCUENTRO INTERNACIONAL CATÁSTROFES Y SOCIEDAD, 1. 1989, Madrid. **Ponencias y comunicaciones...**Madrid: Instituto Tecnológico de Seguridad MAPFRE – ITSEMAP, Cap.1, 1989, p.3-19.

BERTAGNA, S. M. A. & RIEDEL, P. S.. Elaboração de carta de suscetibilidade a escorregamento através de sistema de informação geográfica; média-baixa bacia do rio perequê (Serra do Mar – SP) In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 9. 1999, São Pedro. **Anais...** ABGE, 1999. CD-ROM.

BITAR, O. Y., CERRI, L. E. da S., NAKAZAWA, V. A. Carta de risco geológico e carta geotécnica: uma diferenciação a partir de casos em áreas urbanas no Brasil. In: SIMPÓSIO LATINO AMERICANO SOBRE RISCO GEOLÓGICO URBANO, 2. 1992, Pereira (Colômbia). **Anais...** Pereira: CADER/INGEOMINAS /IUGS/IAEG/ONAD. v.1, 1992, p.35-41.

BOGOSSIAN, F. Avaliação do evento. In: **Primeira Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas**, v.3, 1992, p. 885-895.

BONHAM-CARTER, G. F. Comparison of Image Analysis and Geographic Information Systems for Integrating Geocientific Maps. In: AGTERBERG et. al. (Ed.) **Statistical Analysis in the Earth Sciences**. Ottawa: Geological Survey of Canadá, 1989. p.141-155.

BONHAM-CARTER, G. F. Mapping mineral potential with a geographic information system. In: WORKSHOP OF COMPUTER TREATMENT OF EXPLORATION AND MINING DATA, 1990, Ottawa. **Proceedings...** Toronto: Computer Application in Mining Exploration. 1990. 121-130p.

BONHAM-CARTER, G. F. **Geographic Information System for Geoscientists: Modelling With GIS**. Ottawa: Pergamon, 1994. 398p.

BONHAM-CARTER, G.F.; AGTERBERG, F.P. Application of a microcomputer-based Geographic Information System to mineral potential mapping. **Microcomp. in Geol.** 1990, pp. 49-74.

BONHAM-CARTER, G.F.; AGTERBERG, F.P., WRIGHT, D.F. Integration of geological datasets for gold exploration in Nova Scotia. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 1998. 54, p. 1585-1592.

BONHAM-CARTER, G.F., REDDY, R.K.T. , GALLEY, A.G. Knowledge-driven modeling of volcanogenic massive sulphide potential with a geographic Information System. In: **Mineral Deposit Modeling**. Geological Association of Canada, Special Paper 40, pp. 735-749, 1995.

BOYLE, A. R. "Automated cartography". **World Cartography**, 15, 63-70, 1979.

BRABB, E. E. 1995. Innovative approaches to landslide hazard and risk mapping. In: INTERNATIONAL CONFERENCE AND FIELD WORKSHOP ON LANDSLIDE, 4, 1985, Tokyo. **Proceedings...** Tokyo, 1985, p.17-22.

BURROUGH, P. A. **Principles of geographical information systems for land resources assessment**. Oxford: Clarendon Press, 1986.

BURROUGH, P. A. **Principles of geographical information systems for land resources assessment**. Oxford: Clarendon Press, 1987. 191p.

BURROUGH, P.A. **Principles of geographical information system for land resources assessment**. 1989. Monographs (On Soil and Resources Survey, n.12) - Oxford University Press, Oxford.

BURROUGHS, E. R., JR., AND B. R. THOMAS Declining root strength in douglas-Fir after felling as a factor in slope stability. U.S. Dept. of Agriculture, **Forest Service Research Paper**, INT-190, 27p.

BURTON, L. I., KATES, R. W., WHITE, G. F. **The environment is hazard**. New York: Oxford University Press, 1964. 240p.

CÂMARA, G. **Modelos, linguagens e arquiteturas para banco de dados geográficos**. 1995. Tese (Doutorado em Computação) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V.; PAIVA, J. A.; D'ALGE, J. C. L. **Geoprocessamento: Teoria e Aplicações**. [online]. <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro>>. Dez. 2000.

CAMPANHA, G. A. C., GIMENEZ FILHO, A., SADOWSKI, G. R. Tectônica da Faixa Ribeira In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 38,

1994, Balneário de Camburiu. **Boletim de Resumos Expandidos...** Balneário de Camburiu, 1994. v.1. p.271 – 272.

CAMPANHA, G. A. C. & ENS, H. H. Estruturação geológica da Região do Juquirequerê, São Sebastião. **Rev. Bras. de Geoc.**, 24(1): 32-42, 1996.

CARRARA, A. Multivariate models for landslide hazard evaluation. **Journal of International Association for Mathematical Geology**, v.15, n.3, 1983.

CARRARA, A.,. Landslide hazard mapping by statistical methods: a Black box model approach. In: Siccardi, F., Bras, R.L. (Eds.). In: INT. WORKSHOP ON NATURAL DISASTERS. IN EUROPEAN-MEDITERRANEAN COUNTRIES. 1989, Genova. **Proceedings...**Genova: C.D.S, 1989, pp. 205–224.

CARRARA, A., CARDINALI, M., DETTI, R., GUZZETI, F., PASQUI, V., REICHENBACH, P. GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard. **Earth Surf. Processes Landforms**, 1991. 16, p. 427–445.

CARRARA, A. et al. GIS technology in mapping landslide hazard. In: CARRARA & GUZZETTI (Eds.) **Geographical information System in assessing natural hazards**. Kluwer Academic Publishers, 1995. p.79-92.

CARVALHO, C. S. **Estudo da infiltração em encostas de solos insaturados na Serra do Mar**. 1989. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

CARVALHO, C. S. **Gerenciamento de riscos geotécnicos em encostas urbanas, uma proposta baseada na análise de decisão**. 1996. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

CASTRO, A. L. C. **Glossário de defesa civil: estudo de risco e medicina de desastres..** Brasília: MPO, Departamento de Defesa Civil, 1998. 2ª ed., 283p.

CASTRO, J. F. M. - Aplicação de um Sistema de Informação Geográfica na Temática da Morfodinâmica: o exemplo do estudo da Bacia do Rio Mogi - Cubatão/SP. 1993. Dissertação (Mestrado) – FFLCH, Universidade de São Paulo, São Paulo.

CENDRERO A. et al. Metodologia de elaboracion de mapa de riesgos a escala 1:5000. In: GEOLOGIA AMBIENTAL Y ORDENACIÓN DEL TERRITORIO. 1987, Santander. **Comunicaciones...** Santander, 1987, v.2, p.843-870.

CERRI, L. E. da S. (b) Carta geotécnica: contribuições para uma concepção às necessidades brasileiras. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 6, CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 9, 1990, Salvador. **Anais...** Salvador: ABGE, 1990, v.1. p.319-325.

CERRI, L. E. da S. Riscos geológicos associados a escorregamentos na Região metropolitana de São Paulo. In: SEMINÁRIO DOS PROBLEMAS GEOLÓGICOS E GEOTÉCNICOS NA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO, 1992, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABAS/ABGE/SBG, 1992. p.209-225.

CERRI, L. E. da S. **Riscos geológicos associados a escorregamentos: uma proposta para prevenção de acidentes.** 1993. 197f. Tese (Doutoramento em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.

CERRI, L. E. da S., AMARAL, C. P. 1998. Riscos Geológicos. In: OLIVEIRA. A .M. dos S. , BRITO, S. N. A. (Eds). **Geologia de Engenharia.** São Paulo: ABGE/CNPq/FAPESP, 1998. Cap. 18, p.301-310.

CERRI, L. E. da S. , MACEDO, E. S. de, AUGUSTO FILHO, O. (a) Risco Geológico: Uma nova área de atuação da Geologia de Engenharia no Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 6, 1990, Salvador. **Anais...** Salvador: ABGE/ABMS. 1990, p.319-325.

CHUNG, C. F. et al. Multivariate regression analysis for landslide hazard zonation. In: CARRARA & GUZZETTI (Eds.) **Geographical information System in assessing natural hazards**. Kluwer Academic Publishers, 1992. p.107-133.

COPPOCK, J. T. GIS and natural hazards overview from a GIS perspective. In: CARRARA & GUZZETTI (Eds.) **Geographic Information system in assessing natural hazards**. Kluwer Academic Publishers, 1995. p. 21-34.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J.S. de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento aplicados ao estudo da vulnerabilidade à movimentos de massa no Município de São Sebastião- SP. In: SIMPÓSIO LATINOAMERICANO DE PERCEPCIÓN REMOTA, 9, 2000, Misiones, Argentina. **Anais...Misiones**, 2000.

CROMLEY, R. G. **Digital cartography**. New Jersey: Prentice Hall, Inc. Englewood Cliffs, USA, 1992. 317p.

CRÓSTA, A. P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. São Paulo , 173f. (Tese – Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de Campinas.

CROZIER, M. J. **Landslides: causes, consequences and environment**. London: Croom Helm, 1986. 252p.

CRUDEN, D. M. Suggested nomenclature for landslide. **Bull. Inter. Assoc. of Eng. Geol.**, n.41, p.13-16, 1990.

CRUDEN, D. M. A simple definition of a landslide. **Bull. Inter. Assoc. of Eng. Geol.**, v.43, p.27-29, 1991.

CRUDEN, D. M., VARNES, D. J. Landslides types and processes. In: TURNER A. K., SCHUSTER, R. L. (Eds). **Landslides: investigation and mitigation**.

Washington D. C.: National Academy press. 1996. Part 1, cap. 3, p.36-75. (Special Report, 247, Transportation research Board. National research Council).

DAVIS, C., CÂMARA, G. J. C. Arquitetura de sistemas de Informação Geográfica. In: CÂMARA, G., DAVIS, C., MONTEIRO, A. M. V. (Eds.), **Introdução à Ciência da Geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2001 (2a. edição, revista e ampliada).

DE BIASI, M. Cartas de declividade: confecção e utilização. **Geomorf.**, v.21, p.8-13, 1970.

DE BIASI, M. Carta clinográfica. Os métodos de representação e sua confecção. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 6, p.45-53, 1977.

De PLOEY, J., CRUZ, O. Landslides in the Serra do Mar, Brasil. **Catena**, v.6, n.2, p.11-122, 1979.

DEARMAN, W. R., STRACHAN, A. Engineering geological plans of tyne and wear county, N. E. England. **Bull. Inter. Assoc. Eng. Geol.**, n.28, p.31-41, 1983.

DENSHAM, P. J. Spatial decision support systems. In: MAGUIRE, GOODCHILD, RHIND (Eds.), **Geographical Information Systems: principles and applications**. New York: Longman, 1991. p.403-443.

DEY OUNG, E.J., **Geographic Information Systems applied to rock slope stability analysis**. In Yellowstone County, Montana. 1996, 86pp. Unpublished MS Thesis (Department of Earth Sciences). Montana State University, Bozeman, MT.

DIETRICH, W. E., & DUNNE, T., Sediment budget for a small catchment in mountainous terrain. **Zeit. für Geomorph.**, Suppl. 29, 191-206, 1978.

DIETRICH, W. E., DUNNE, T., HUMPHREY, N. F., REID, L. M., Construction of sediment budgets for drainage basins. In: F. J. Swanson, R. J. Janda, T. Dunne, and D. N. Swanson (Ed.) **Sediment Budgets and Routing in Forested Drainage**

Basins. General Technical Report PNW-141, Forest Service, U.S. Dept. of Agriculture, p. 5 - 23, 1982.

DIETRICH, W. E., REISS, R., HSU, M.-L., MONTGOMERY, D. R., A process-based model for colluvial soil depth and shallow landsliding using digital elevation data. **Hydrol. Proces.**, v. 9, p. 383-400, 1995.

DIETRICH, W. E., MONTGOMERY, D. R. **A digital terrain model for mapping shallow landslide potential – 1998. NCASI.** Disponível em: <http://socrates.berkeley.edu/~geomorph/shalstab/>

DINIZ, N. C. **Automação da Cartografia Geotécnica: uma ferramenta de estudos e projetos para avaliação ambiental.** 1998. 2v. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Escola politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

DUARTE, P. A. **Fundamentos da cartografia.** Florianópolis: Editora da Universidade Federal de Santa Catarina, 1994.

DUNNE, T. Stochastic aspects of the relations between climate, hydrology and landform evolution. **Trans. Japan. Geomorph. Union** , 12, 1-24, 1991.

EASTMAN, J. R. **IDRISI: user's guide.** Massachusetts: Clark University Graduate School of Geography, 1992. 178p.

ENDO, T., AND T. TSURUTA, The effects of tree roots on the shearing strength of soil. **Annual Report Forest Experiment Station, Hokkaido**, 167-182, 1969.

FELGUEIRAS, C. A. Modelagem numérica de terreno. In: CÂMARA, G., DAVIS, C., MONTEIRO, A. M. V. (Eds.), **Introdução à ciência da geoinformação.** São José dos Campos: INPE, 2001 (2a. edição, revista e ampliada).

FERNANDES, N.F., AMARAL, C. P. Movimentos de massa: uma abordagem geológico-geomorfológica. In: GUERRA, A.J. T., CUNHA, S. B. **Geomorfologia e Meio Ambiente.** Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1996. Cap. 3, p. 23-194.

FERRARI J. A. *et al.* **Mapeamento da suscetibilidade à erosão na bacia do rio Quilombo-SP.** Instituto Geológico/SMA. São Paulo, Boletim n.12, 1996.

FERREIRA, M.C. Procedimentos para a Elaboração de Mapas de Declividade e de Orientação de vertentes - Utilizando o Sistema de Informação Geográfica IDRISI. In: SIMPÓSIO DE QUANTIFICAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS, 5 1994, Rio Claro. **Boletim...** Rio Claro: IGCE/UNESP, 1994. p. 35-37.

FRANCA-ROCHA, W. **Modelagem metalogenética na bacia de Irecê (Ba) através de sistema de informações geográficas (sig).** 2001. 271f. Tese (Doutorado em Ciência Geológica) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, Bahia.

FRANCA-ROCHA, W. J. S., BONHAM-CARTER, G., MISI, A. Estimando a favorabilidade para recursos minerais na Bacia de Irecê pelos métodos “Lógica Nebulosa “ e “Pesos da Evidências”. **Sitientibus**, n.22, p.27 – 54, 2000.

FREIRE, E. S. de M. Movimentos coletivos de solos e rochas e sua moderna sistemática. **Construção**, Rio de Janeiro, 8(95): 10-18. 1965.

GARDA, G. M., SCHROSCHER, H. D. Os diques máficos e ultramáficos da região costeira entre São Sebastião e Ubatuba, São Paulo – SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 38, 1994. **Boletim de resumos...** Camboriu: SBG, v.3, 1994, p.62-63.

GOES, M. H. B. Áreas de riscos de desmoronamentos/deslizamentos: uma aplicação de geoprocessamento de dados. **Geociências**, Número especial, p.107-124, 1990.

GOKCEOGLU, C., AKSOY, H. Landslide susceptibility mapping of the slopes in the residual soils of the Mengen region Turkey by deterministic stability analyses and image processing techniques. **Engin. Geol.**, 44, 147–161, 1996.

GRAY, D. H.; MEGAHAN, W. F. **Forest vegetation removal and slope stability in the Idaho Batholith**. Res. Pap. INT-271, Forest Service, U.S. Dept. of Agriculture, Ogden, UT, 23pp., 1981.

GUERRA, S. M. S. **Cartografia Geológico-Geotécnica de Áreas Costeiras: O exemplo de Suape-PE**. 1998. 187f. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas/Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.

GUIDICINI, G., NIEBLE, C. M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. São Paulo: Edgard Blücher; Ed. da Universidade de São Paulo, 1976. 170p.

GUIDICINI, G., NIEBLE, C. M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. São Paulo. Edgard Blücher; Ed. da Universidade de São Paulo, 1984. 194p.

GUIDICINI, G., IWASA, O. Y. **Ensaio de correlação entre pluviosidade e escorregamentos no meio tropical úmido**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1976. 48p. (publicação, 1080).

GUPTA, R.P., JOSHI, B. C. Landslide hazard zoning using the GIS approach - a case study from the Ramganga Catchment, Himalayas. **Eng. Geol.**, 28, 119-131, 1990.

HASUI, Y., SADOWSKI, G. R. Evolução geológica do pré-Cambriano na região Sudeste do estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Geociências**, n.6, p.182-200, 1976.

HASUI, Y., MIOTO, J. M., MORALES, N.. Geologia do Pré-Cambriano. In: FALCONI, F. F. ; NEGRO JR, A. (Org.) **Solos do Litoral do Estado de São Paulo**. FAPESP/ABMS. 1994. 316p.

HASUI, Y. et al. **Geologia da região administrativa 3 (Vale do Paraíba) e parte da Região administrativa 2 (litoral)**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas., 1978. Monografia 1.

HEIMSATH, A. M., DIETRICH, W. E., NISHIZUMI, K., FINKEL, R. C., The soil production function and landscape equilibrium. **Nature**, 388, 358-361, 1997.

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.

HUTCHINSON, M. F. & DOWLING, T. I. 1991. A continental hydrological assessment of a new grid-based digital elevation model of Australia. In: ZHANG, W., MONTGOMERY, D.R. Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrologic simulations. **Water Resour. Res**, 30, 1019–1028, 1994.

IAEG – INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ENGINEERING GEOLOGY. **Engineering geological maps: a guide to their preparation**. Paris: Unesco Press, 1976. 79p.

INSTITUTO GEOLÓGICO (IG-SMA) **Carta de risco a movimentos de massa e inundação do município de São Sebastião**. São Paulo: Instituto Geológico, 1996 (Relatório técnico).

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (IPT) **Programa Serra do Mar: Carta Geotécnica da Serra do Mar nas folhas de Santos e Riacho Grande**. São Paulo, 1998. Relatório nº 26504.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (IPT) **Manual de ocupação de encostas**. São Paulo, 1991. 216p. (Publicação, 1831)

JOHNSON, K.A. & SITAR, N. Hydrologic conditions leading to debris flow initiation. **Can. Geotechn. J.**, 27(6) p. 789-801, 1989.

JOHNSON, A.M., BURNHAM, C.W., ALLEN, C.R., MUEHLBERGER, W. (Eds.)
Richard H. Jahns Memorial Volume. **Eng. Geol.**, vol. 27, pp. 509–542, 1997.

KEMP, L.D., BONHAM-CARTER, G.F. AND RAINES, G.L. **Arc-WofE: Arcview extension for weights of evidence mapping.** Disponível em:
<http://ntserv.gis.nrcan.gc.ca/wofe>. Acesso em: 2001.

LINEBACK et al. Assessing landslide potential using GIS, soil wetness modelling and topographic attributes, Payette River, Idaho. **Geomorph.**, v. 37, p. 149-165, 2001.

LOMBARDI, M.A., AMARAL, G. Potencialidade das imagens LANDSAT para o monitoramento de processos geomorfológicos acelerados. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE SENSORIAMENTO REMOTO, 1, 1978, São José dos Campos. **Anais...** São José dos Campos: SBG: 1978. v.1, p.348-353.

MACEDO, E. S. de. 2001. **Elaboração de cadastro de risco iminente relacionado a escorregamentos: avaliação experiência profissional, formação acadêmica e subjetividade.** 2001. 206f. il. + anexo. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.

MACHADO FILHO, J. G. **Estabilidade de encostas e condicionantes geológicos, geomorfológicos, estruturais, num trecho da Serra de Cubatão.** 2000. 172f. Dissertação (Mestrado em Geoquímica e Geotectônica) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

MAFFRA, C. de Q. T. **Geologia estrutural do embasamento cristalino na região de São Sebastião, SP: evidências de um domínio transpressivo.** 2000. 113f. São Paulo. Dissertação (Mestrado em Geoquímica e Geotectônica) Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

MAHAHARAJ, R. I., 1993. Landslide processes and landslide susceptibility analysis from na upland watershed. A case study from St. Andrew, Jamaica, West Indies. **Eng. Geol.**, 34, 53-79.

MARBLE, D. F. The Computer and Cartography. **The Am. Cartogr.**, 14, p. 101-103, 1987.

MAURO. C.A *et al.* Contribuição ao planejamento ambiental de Cosmópolis. São Paulo, Brasil. In: ENCUESTRO DE GEÓGRAFOS DE AMERICA LATINA, 3. Toluca. UAMEN, v.4, 1991, p.391-419.

MELO, H. M. C. F., CINTRA, J. P. Erros Associados a Digitalização de Mapas. In: IV CONFERÊNCIA LATINOAMERICANA SOBRE SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA/2º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOPROCESSAMENTO, São Paulo, 1993. **Anais...** São Paulo: EPUSP/SIBSIG, 1993. p.29-46.

MELO, M. S., PIRES NETO, A. G. Esboço geológico da província costeira entre as Serras do Juquirequerê e Parati, Estado de São Paulo. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA REGIONAL, 1, 1977. **Atas...** São Paulo, 1977, p.303-323.

MENDES, I. A. **A dinâmica erosiva do escoamento pluvial na Bacia do Córrego Lafone - Araçatuba – SP.** 1993. Tese (Doutorado em Geografia Física). FFLCH. USP. São Paulo.

MONTGOMERY, D. R., DIETRICH, W. E., TORRES, R., ANDERSON, S. P., HEFFNER, J. T. , LOAGUE, K., Hydrologic Response of a Steep Unchanneled Valley to Natural and Applied Rainfall. **Water Resour. Res.**, v. 33, p. 91-109, 1997.

MOREIRA, F. R. da S. **Uso e avaliação de técnicas de integração e análise espacial de dados em pesquisa mineral aplicados ao planalto de Poços de Caldas.** 2001. 154f. Dissertação (Mestrado em sensoriamento remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais- INPE, São José dos Campos.

NOGUEIRA, F. R., **Gerenciamento de riscos ambientais associados a escorregamentos: Contribuição às políticas públicas municipais para áreas de ocupação subnormal**. 2002. 268f. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.

NEYCOCK, A., PASEK, J., RYBAR, J. Classification of landslides and other mass movements. **Rock Mechan.**, p.71-78, 1972.

OLIVEIRA, C. de. **Dicionário cartográfico**. Ed. Rio de Janeiro, IBGE, 1983. 2, 781p.

PENDOCK, N.; NEDELJKOVIC, V. Integrating geophysical data sets using probabilistics methods. In: THEMATIC CONFERENCE AND WORKSHOP ON APPLIED GEOLOGIC REMOTE SENSING, 11, 1996, Las Vegas. **Proceedings...** Nevada, 1996, v.2, p.621-628.

PERALTA, E. Elaboração do Modelo Digital para Determinar Áreas de Risco de Deslizamentos Utilizando o SAGA. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOPROCESSAMENTO. 1, 1990, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1990. p. 248-261.

PIKE , R. I., 1988. The geometric signature: quantifying landslide terrain types from digital elevation models. **Math. Geol.**, 20, 491-511.

PONÇANO, W. L., CARNEIRO, C. D. R., BISTRICHI, C. A, ALMEIDA, F. F. M., PRANDINI, F. L. **Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo**, Escala 1:1000000. São Paulo, IPT/DMGA, 1981. 2v. , 94p.

PRANDINI, F. L., NAKAZAWA, V. A., FREITAS, C. G. de L., CUNHA, M. A. Prevenção e controle de acidentes geológicos no Brasil: perspectivas e estratégias. In: SIMPÓSIO LATINO-AMERICANO SOBRE RISCO GEOLÓGICO URBANO, 1, 1990, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABGE, 1990, p.370-379.

QUINTANILHA, J. A. Entrada e conversão de dados: processos de construção de bases de dados digitais e dados espaciais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOPROCESSAMENTO, 3, 1995, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Escola Politécnica, universidade de São Paulo, 1995, p.29-58.

REDDY, R.K.T. & BONHAM-CARTER, G.F. A decision-tree approach to mineral potential mapping in Snow Lake area, Manitoba. **Canadian J. Remote Sensing**, 17: 191- 200, 1991.

RHIND, D.H. “**Computer – Aided Cartography**” **transactions**. Institute of British Geographer, 2, 71-97,1977.

RHIND, D.H. The nature of Computer – Assisted Cartography. **Progress in Contemporary Cartography**, 1, 25-37, 1980.

RIEDEL, P.S. **Condicionantes estruturais na estabilidade de taludes: uma abordagem regional, com apoio de técnicas de sensoriamento remoto**. 1994. 235 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

ROSTIROLLA, S. P. **Avaliação da favorabilidade em exploração: Um enfoque metodológico**. 1996. 164p. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.

SANTOS, A. R. **Fundamentos filosóficos e metodológicos da geologia de engenharia**. São Paulo, 1984. Publicação IPT n^o 2088. (comunicação técnica).

SANTOS, A. R. dos. **Geologia de Engenharia: Conceitos, método e prática** . São Paulo – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. ABGE – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental. 2002. Publicação (IPT; 2797), 222p.

SANTOS, M.C. R. dos. **Manual de fundamentos cartográficos e diretrizes gerais para elaboração de mapas geológicos, geomorfológicos e geotécnicos.** São Paulo/SP. Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1990. Publicação IPT, v. 1773.

SASSA, K. Geotechnical classification of landslides. **Landslide News**, n.3, p.21-24, 1989.

SESTINI, M. F. 2000. **Variáveis geomorfológicas no estudo de deslizamentos em Caraguatatuba – SP utilizando imagens TM – LANDSAT e SIG. 2000. 140f.** Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas espaciais (INPE), São José do Campos.

SHARPE, C. F. S. **Landslides and related phenomena.** New York: Columbia University press, 1938.137p.

SHEPERD, I. D. H. Information integration and GIS. In: McGUIRE, D. J. GOODCHILD, M. F., RHIND, D.W. (Eds.), **Geographical Information systems: Principles and Applications.** New York: Longman, 1991. p. 357-360.

SIDLE, R. C., A theoretical model of the effects of timber harvesting on slope stability, **Water Resour. Res.**, 28, 1897-1910, 1992.

SIDLE, R. C. , PEARCE, A. J., O' LOUGHLIN, C. L. Hillslope stability and Land Use. **American Geoph. Union**, Washington D.C., 140p. 1985.

SILVA, M. M. DE O.; **Investigação e análise dos movimentos de massa gravitacionais e processos correlatos na região da Serra de Ouro Preto – Ouro Preto – MG – Escala 1:5.000.** 2001. 160f.: il + 6 mapas. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.

SOARES, P. C., SOARES, A. P., FIORI, A. P. Raciocínio probabilístico aplicado à suscetibilidade de escorregamentos: Um estudo de caso em Campo Largo, Paraná, Brasil. **Bol. Paranaense de Geoc.**, n.51, p. 59-76. 2002. Editora UFPR.

SOUZA C. R. de G. & SUGUIO, K. Coastal erosion and beach morphodynamics along the state of São Paulo (SE Brazil). **Anais da Acad. Bras. de Cien.**, 68(3): 405-424, 1995a.

SOUZA C. R. de G. & SUGUIO, K. Processos erosivos no litoral de São Paulo: um risco crescente. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROSÃO, 5, Bauru, 1995. **Anais e boletim de campo...** Bauru: ABGE/UNESP. 1995b, P.471-474.

SOUZA C. R. de G. **Considerações sobre os processos sedimentares quaternários e atuais na região de Caraguatatuba.** 1990. 334f. Dissertação (Mestrado) – Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo.

SPIEGELHALTER, D. J., & KNILL-JONES, R. P. 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, 1984.

SPIRIDINOV, A. I. **Princípios de la metodología de las investigaciones de campo y el mapeo geomorfológico.** 1981. 3v. Universidad de la Habana. Faculdade de Geografia, Habana, Cuba.

STEVENSON, P. C. C. An empirical method for the evaluation of relative landslides risk. **Bull. Intern. Assoc. Eng. Geol.**, n.16, p.69-72, 1984.

SUGUIO, K.; MARTIN Quaternary marine formations of the states of São Paulo and southern Rio de Janeiro. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COASTAL EVOLUTION IN THE QUATERNARY, São Paulo, 1978. 55p. (special publication, nº 1.)

TATIZANA, C. *et al.* Análise de correlação entre chuvas e escorregamentos na Serra do Mar, município de Cubatão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE

ENGENHARIA, 5, 1987, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABGE, 1987a ,v.2, p.225-236.

TATIZANA, C. *et al.* Modelamento numérico da análise de correlação entre chuvas e escorregamentos aplicado às encostas da Serra do Mar no município de Cubatão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 5, 1987, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABGE, 1987b, v.2, p.237-248

TEIXEIRA, A. L. A., PROCHNOW, M. C .R., SUAREZ, R., CARDOZO, S. Determinação das Áreas de Risco à Erosão na Bacia do Córrego Monjolo Grande (SP), Através do Uso de um SIG. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOPROCESSAMENTO, 1, 1990. São Paulo. **Anais...**São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1990. p.300-307.

TERLIEN, M. J. T., WESTEN, C. J. V., ASCH, W. J. V. Deterministic modeling in GIS-based landslide hazard assessment. In: CARRARA & GUZZETTI (Ed.), **Geographical Information Systems in assessing natural hazards**. Kluwer Academic publishers, 1995. p. 57-78.

TOMLINSON, R. F, CALKINS, H. W., MARBLE, D. F. **Computer Handling of Geographical Data**. Paris: UNESCO Press, 1976. (Natural Resources Research Series, XIII).

VARGAS, M. **Metodologia da pesquisa tecnológica**. Rio de Janeiro: Ed. Globo, 1985. 243p.

VARGAS, M. Revisão histórico-conceitual dos escorregamentos da Serra do Mar. **Solos e Rochas**, v.22, n.1, p.53-83, 1999.

VARNES, D. J. **The logic of engineering geological and related maps. A discussion of the definition and classification of map units, with special references to problems presented by maps intended for use in civil engineering**. Washington: USGS,1974. 48p. (Professional paper, 837)

VARNES, D. J. Slope movement types and processes. In: SCHUSTER & KRIZEK (Eds.). **Landslides analysis and control**. Washington, 1978. p.11-33 (National Academy of Sciences).

VARNES, D. J. et al. **Landslide hazard zonation: a review of principles and practice**. Paris: UNESCO,1985. 63p.

VEDOVELLO, R. **Zoneamentos geotécnicos aplicados a gestão ambiental, a partir de unidades básicas de compartimentação – UBCs**. 2000. 154f. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.

WENTWORT, C. J. A Simplified Method of Determining the Average Slope and Land Surface. **American J. Sci.**, 5th series, v.20, 1930. p.184-194, 1930.

WHITE, G. F. (Ed.) **Natural hazards: local, national, global**. New York: Oxford University Press, 1974. 285p.

WICKMAN, A., TIMBERLAKE, L. **Desastres naturales: fuerza mayor y obra del hombre**. Nottingham: Russel Press, 1985. 181p.

WILSON, C. J., & DIETRICH, D. W. E. The contribution of bedrock groundwater flow to storm runoff and high pore pressure development in hollows. In: R. L. Beschta, T. Blinn, G. E. Grant, G. G. Ice, and F. J. Swanson (Eds.) **Erosion and Sedimentation in the Pacific Rim**. Int. Assoc. Hyd. Sci. Pub. 1987. 165, p. 49-60.

WOLLE, C. M. **Taludes naturais: mecanismos de instabilização e critérios de segurança**. 1980. 345f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica. Universidade de São Paulo, São Paulo.

ZACHARIAS, A. A. **Metodologias convencionais e digitais para a elaboração de cartas morfométricas do relevo**. 2001. 166f. il. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.

ZARUBA, Q. & MENCI, V. **Landslide and their control**. Amsterdã: Elsevier, 1969. 205p.

ZHANG, W., MONTGOMERY, D.R. Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrologic simulations. **Water Resour. Res.**, 30, 1019–1028, 1994.

ZUQUETTE, L.V. **Análise crítica da cartografia geotécnica e proposta metodológica para condições brasileiras**. 1987. 3v. 673f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos.

ZUQUETTE, L.V. **Importância do mapeamento geotécnico no uso e ocupação do meio físico: fundamentos e guia para elaboração**. 1993. 2v. Tese (Livre-docência) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

ZUQUETTE, L.V.; NAKAZAWA, V. A. Cartas de geologia de engenharia. In: OLIVEIRA & BRITO (Ed). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: ABGE, 1998. p. 283-300.

ZUQUETTE, L.V., GANDOFI, N., PEJON, O. J. O mapeamento geotécnico na previsão e prevenção de acidentes geológicos em áreas urbanas. In: SIMPÓSIO LATINO-AMERICANO SOBRE RISCO GEOLÓGICO URBANO, 1, 1990, São Paulo. **Anais...** São Paulo.