

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JOSEMAR PEREIRA DA SILVA

ANÁLISE DO ÍNDICE DE ESTABILIDADE DAS VERTENTES DA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO RIBEIRÃO - PARANAGUÁ / PR

CURITIBA
2011

JOSEMAR PEREIRA DA SILVA

**ANÁLISE DO ÍNDICE DE ESTABILIDADE DAS VERTENTES DA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO RIBEIRÃO - PARANAGUÁ / PR**

Monografia apresentada para a conclusão
do curso de Bacharelado em Geografia da
Universidade Federal do Paraná.
Orientador: Dr. Claudinei Taborda da Silveira

**CURITIBA
2011**

RESUMO

A intensa precipitação pluviométrica do dia 11 de março de 2011 desencadeou diversos processos de escorregamentos de forma simultânea na Serra do Mar Paranaense. Diante deste cenário foram utilizados dois métodos de modelagem matemática para previsão de áreas susceptíveis a desestabilização de vertentes considerando o solo todo saturado. Para este trabalho adotou-se como área de estudo a bacia hidrográfica do Rio Ribeirão que se localiza no município de Paranaguá, onde foram identificadas 232 cicatrizes escorregamentos com o auxílio de imagens de satélite Wordview com resolução espacial de 0,5 metros. A adoção dos métodos teve como objetivo a simulação e validação dos modelos matemáticos para predição de áreas que tiveram escorregamentos identificados com base em um inventário de cicatrizes de escorregamentos, bem como a identificação de suas potencialidades e níveis de acerto considerando os materiais cartográficos disponíveis. Para realização deste trabalho foi necessário a confecção de um modelo digital de terreno (MDT) e um mapeamento de solos que serviu de apoio para identificação das áreas de calibração com base nos parâmetros geotécnicos disponíveis. O primeiro método adotado consistiu na elaboração de um mapeamento sistemático utilizando o fator de segurança proposto por Fiori e Carmignani (2009) que é baseado na teoria do equilíbrio-limite. O segundo método foi realizado utilizando o software SINMAP (Pack, 1998) que é baseado na teoria do talude infinito combinado com um modelo hidrológico estacionário e apresenta uma incerteza no limites máximos e mínimos para cada parâmetro de calibração. Os resultados das análises dos dois métodos empregados apresentam valores de instabilidade, onde cerca de 41,63% para o método (1) e 65,56% para a método (2) para a porção oeste da bacia, com níveis de acerto respectivamente de 82,33% e 96,24% para os escorregamentos identificados. Os resultados mostram que os modelos não são perfeitos, mas podem apontar caminhos para a investigação e compreensão dos processos naturais.

Palavrass-chave: SINMAP, Fator de Segurança, escorregamentos.

LISTA DE FIGURAS E MAPAS

FIGURA 01 – MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA BACIA DO RIO RIBEIRÃO	12
FIGURA 02 – ESQUEMA DE RASTEJO (<i>creep</i>)	18
FIGURA 03 – ESCORREGAMENTO ROTACIONAL (<i>slump</i>)	18
FIGURA 04 - ESCORREGAMENTO TRANSLACIONAL (<i>translational landslide</i>).....	19
FIGURA 05 – ESQUEMA DE TOMBAMENTO (<i>falls</i>).....	20
FIGURA 06 – ESQUEMA DE CORRIDA DE LAMA (<i>earthflow</i>)	20
FIGURA 07 – FIGURA 07 - FLUXO DA ÁGUA NO PLANO DE CURVATURA (SETAS PONTILHADAS) E FLUXO DA ÁGUA NO PERFIL DA CURVATURA DAS VERTENTES (SETAS CONTÍNUAS)	22
FIGURA 08 – ESQUEMA DA GEOMETRIA ADOTADA PELO SINMAP	30
FIGURA 09 – MAPA INVENTÁRIO DAS CICATRIZES DE ESCORREGAMENTOS	36
FIGURA 10 – MAPAS GERADOS PELO SINMAP	42
FIGURA 11 – MAPA DO ÍNDICE DE ESTABILIDADE GERADO PELO SINMAP....	44
FIGURA 12 – DETALHE DOS ESCORREGAMENTOS SOBRE O MAPA DE ÍNDICE DE ESTABILIDADE DO MÉTODO(1)	50
FIGURA 13 – DETALHE DOS ESCORREGAMENTOS SOBRE O MAPA DE ÍNDICE DE ESTABILIDADE DO MÉTODO(2)	51
FIGURA 14 – MAPA DE SOLOS E OCORRÊNCIA DE ESCORREGAMENTOS....	52
FIGURA 15 – EXEMPLO DE ESCORREGAMENTOS	56
 MAPA 1 – ÍNDICE DE ESTABILIDADE DAS VERTENTES DO RIO RIBEIRÃO – PARANAGUÁ – PR / MÉTODO (1)	47
MAPA 2 – ÍNDICE DE ESTABILIDADE DAS VERTENTES DO RIO RIBEIRÃO – PARANAGUÁ – PR / MÉTODO (2)	48

LISTA DE QUADROS E TABELAS

QUADRO 01 – CLASSIFICAÇÃO E TIPOLOGIA DOS MOVIMENTOS DE MASSA	17
QUADRO 02 – ÍNDICE DE ESTABILIDADE DO SINMAP.....	32
QUADRO 03 – ÍNDICE DE ESTABILIDADE ADOTADO.....	39
TABELA 01 – PARÂMETROS PEDOLÓGICOS.....	34
TABELA 02 – INTERVALOS ADOTADOS CONFORME TIPOLOGIA DO SOLO.....	38
TABELA 03 – PARÂMETROS DE ENTRADA PARA A APLICAÇÃO DO MÉTODO (2)	41
TABELA 04 – ÍNDICE DE ESTABILIDADE PRELIMINAR PARA O MÉTODO (2)....	45
TABELA 05 – ÍNDICE DE ESTABILIDADE DO MÉTODO (1)	46
TABELA 06 – ÍNDICE DE ESTABILIDADE DO MÉTODO (2).....	46
TABELA 07 – COMPARAÇÃO ENTRE OS DOIS MÉTODOS	49
TABELA 08 – MATRIZ DE ERRO/CONFUSÃO	57

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	07
1.1. JUSTIFICATIVA	09
1.2. OBJETIVOS.....	11
 2. A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO RIBEIRÃO – PARANAGUÁ/PR	12
2.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	12
2.2. GEOLOGIA	13
2.3. GEOMORFOLOGIA	13
2.4. PEDOLOGIA	14
2.5. VEGETAÇÃO	14
2.6. CLIMA	15
 3. REVISÃO TEÓRICA-METODOLÓGICA.....	16
3.1. MOVIMENTOS DE MASSA	16
3.2. CONDICIONANTES DOS ESCORREGAMENTOS	21
3.3. MODELOS	25
3.4. FATOR DE SEGURANÇA.....	27
3.5. SINMAP (STABILITY INDEX MAPPING)	29
 4. MATERIAIS E MÉTODOS	34
4.1.1. BASES CARTOGRÁFICAS.....	34
4.1.2. PARÂMETROS PEDOLÓGICOS	34
4.1.3. VEGETAÇÃO E VENTO	35
4.1.4. INVENTÁRIO DE CICATRIZES DE ESCORREGAMENTOS	35
4.2. MÉTODOS	37
4.2.1. PRIMEIRA ETAPA	37
4.2.2. SEGUNDA ETAPA	38
4.2.3. TERCEIRA ETAPA	41
4.2.4. QUARTA ETAPA	45
 6. ANÁLISE DOS RESULTADOS	46
7. CONCLUSÕES	59
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos tem se noticiado com frequência desastres naturais em todo globo terrestre. Estes eventos têm acontecido principalmente devido ao aumento da população, ocupação desordenada e ao intenso processo de urbanização e industrialização em áreas de risco.

Segundo Kobiyama et al., (2006) os principais fatores que contribuem para desencadear estes desastres nas áreas urbanas destacam-se a impermeabilização do solo, o adensamento das construções e a poluição do ar. Enquanto que nas áreas rurais, destaca-se a compactação dos solos, o assoreamento dos rios, os desmatamentos e as queimadas.

No Brasil, os principais fenômenos relacionados a desastres naturais são derivados da dinâmica externa da Terra, tais como, inundações e enchentes, escorregamentos de solos e/ou rochas e tempestades (TOMINAGA et al.; 2009). Estes fenômenos acontecem normalmente associados a eventos pluviométricos intensos e prolongados nos períodos chuvosos que correspondem ao inverno na região nordeste e ao verão na região sul e sudeste. Exemplo que cabe ser destacado ocorreu recentemente, em março de 2011, quando diversas áreas da Serra do Mar do litoral do Estado do Paraná, principalmente nas áreas que compreendem os municípios de Antonina, Morretes e Paranaguá sofreram com a ocorrência de inúmeros escorregamentos, corridas de detritos e inundações.

Os impactos imediatos divulgados pela defesa civil do Estado do Paraná foram a destruição parcial e total milhares de moradias deixando inúmeras pessoas desabrigadas e desalojadas, dois óbitos, além da destruição parcial da ponte sobre o rio Jacaré na BR 277 que liga a cidade de Curitiba ao porto de Paranaguá. Estes eventos catastróficos exigem do poder público soluções rápidas e apropriadas para o correto ordenamento do território, evitando assim prejuízos sociais, econômicos e perdas de vidas. Para o meio acadêmico, a busca é entender a dinâmica natural que ali se faz presente, mensurando-a e propondo um modelo que melhor represente-a.

Devido à complexidade da natureza dos movimentos de massa, existe uma grande dificuldade em se prever a configuração exata do mecanismo de ruptura e do volume a ser transportado. Neste sentido, dependendo das condições do terreno e de algumas suposições analíticas, o uso de modelos matemáticos teóricos adequados pode auxiliar na identificação das áreas mais propensas a estes

fenômenos que normalmente ocorrem em ambientes serranos e com pluviosidade constante (FERNANDES et. al., in GUERRA, 2007).

Diante dessa problemática, o presente trabalho teve como objetivo principal aplicar dois métodos para a previsão de escorregamentos rasos associados a técnicas de geoprocessamento. A área de estudo adotada foi a bacia hidrográfica do Rio Ribeirão que se localiza no município de Paranaguá, uma das áreas afetadas no evento de março de 2011 na Serra do Mar Paranaense.

1.2. JUSTIFICATIVA

Segundo informações divulgadas pelo SIMEPAR (Sistema Meteorológico do Paraná), desde o início de mês de março de 2011 até as 11h30 do dia 12 de março, choveu cerca de 176 mm em Guaratuba e em Morretes o volume de chuva chegou a 305 mm. A média histórica para Morretes para esse período é de 268 mm (SIMEPAR, 2011).

Para tanto, durante a intensa precipitação pluviométrica do dia 11 de março de 2011, ocorreram diversos processos de escorregamentos simultâneos em toda região que compreende a Serra da Prata.

Estes escorregamentos se concentraram principalmente no terço superior das vertentes da serra, que a partir de suas rupturas ocasionaram a movimentação de grandes blocos e solos que por efeito da gravidade e intenso volume de água transportaram junto com sua massa diversos troncos de árvores e corridas de detritos.

A ação concentrada deste evento ocasionou o transporte de diversos materiais com variadas granulometrias que foram sendo depositados ao longo das margens dos rios, resultando em um intenso assoreamento dos rios e inundação das planícies aluviais.

Apesar dos diversos danos causados, deve-se levar em conta que a Serra do Mar é caracterizada por ser um ambiente de elevada pluviosidade e que os fenômenos mencionados fazem parte da própria dinâmica de evolução desta paisagem.

Diante desta problemática, uma das formas para mitigação destes eventos é a utilização de mapeamentos sistemáticos de previsão de áreas susceptíveis a escorregamentos. Para este trabalho optou-se em adotar o uso de mapeamentos apoiados em modelos matemáticos.

Estes modelos são desenvolvidos com base em fundamentos físicos e podem auxiliar em políticas públicas adequadas para o melhor aproveitamento do território e de tal modo evitando prejuízos decorrentes de eventos que envolvem escorregamentos translacionais.

Sendo assim, a proposta deste trabalho é fundamentada na aplicação e validação de dois métodos que visam à indicação de áreas que apresentem certa instabilidade momentânea a escorregamentos nos períodos de intensa pluviosidade.

Com base nestas afirmações, procurou-se neste trabalho aplicar métodos apoiados em modelos matemáticos computacionais que são operacionalizados em ambiente SIG para elaboração de mapeamentos com vistas à mitigação de uso de áreas que apresentem riscos de escorregamentos translacionais como os ocorridos em março de 2011 na Serra do Mar Paranaense.

1.1. OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho foi a elaboração de dois mapeamentos do Índice de Estabilidade (SI) da bacia hidrográfica do Rio Ribeirão. Estes mapeamentos foram apoiados em dois métodos matemáticos que utilizam como base a modelagem do fator de segurança (FS) que representa a relação entre as forças de resistência e as que favorecem a ocorrência do deslocamento do material em uma vertente.

Os objetivos específicos são:

- a) Elaboração do Modelo Digital de Terreno (MDT);
- b) Elaboração do mapa de solos e dos temas geotécnicos (Espessura do solo, coesão, ângulo de atrito interno e peso natural do solo;
- c) Elaboração do mapa de Índice de Estabilidade (SI) a partir da proposta de (FIORI e CARMIGNANI, 2009);
- d) Elaboração do mapa de Índice de Estabilidade (SI) a partir do software SINMAP (PACK, 1998);
- e) Sobreposição do inventário de cicatrizes de escorregamentos (março de 2011) para análise dos resultados apresentados pelos dois métodos;
- f) Conferência da confiabilidade dos dois métodos aplicados e discussão de suas potencialidades;
- g) Realização de uma análise dos principais condicionantes que promoveram a instabilidade das vertentes da área de estudo.

2. BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO RIBEIRÃO – PARANAGUÁ/PR

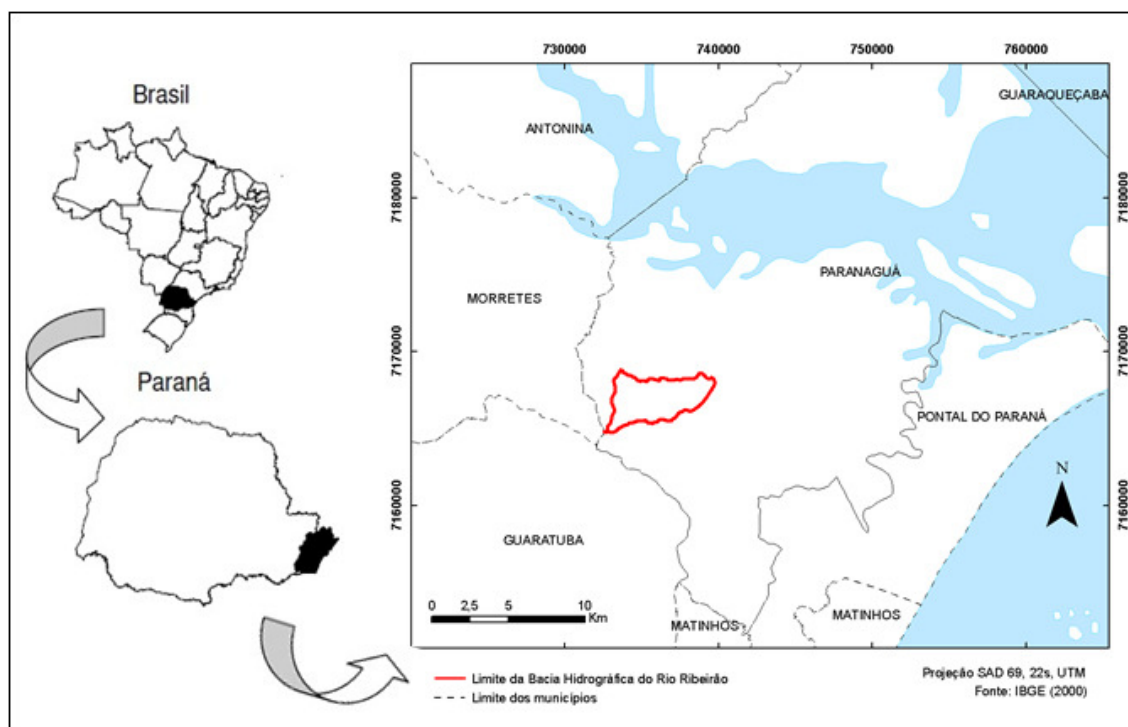
2.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A Serra do Mar Paranaense representa a zona limítrofe entre o Primeiro Planalto e a Planície Costeira.

Segundo Maack (2002) entre a Serra do Mar e o litoral do Paraná, localiza-se o Cinturão Granitóide Costeiro que se inclui o batólito Paranaguá. Este cinturão constitui-se de granito-gnaisses, migmatitos e outras rochas foliadas que sustentam um relevo acidentado de morros e serras, com vales profundos, estreitos e vertentes rochosas muito íngremes.

Segundo Cordinari e Girandi (1967) a Serra do Mar possui um desnível acentuadamente maior para o lado do oceano do que para o lado continental.

FIGURA 01 – MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA BACIA DO RIO RIBEIRÃO



Autor: Josemar (2011) MELHORAR MAPA, LEGENDA

A área de estudo do presente trabalho compreende a bacia hidrográfica do Rio Ribeirão que se localiza no município de Paranaguá, região litorânea do estado

do Paraná (FIGURA 01). Possui uma área de 16,511km², sendo que 68% da área apresenta declividades superior a 14°. A área de estudo está a aproximadamente 32km da sede do município de Morretes e a 12Km da sede do município de Paranaguá. O principal acesso é feito pela PR-508 (Rodovia Alexandra Matinhos) que liga a cidade de Paranaguá a Matinhos/Guaratuba.

2.2. GEOLOGIA

Segundo Mineropar (2005) a área da Bacia do Rio Ribeirão está inserida sobre quatro unidades formações geológicas. A unidade Complexo Granítico Migmatítico localiza-se oeste e corresponde as áreas mais elevadas da bacia e apresenta uma suíte granítica foliada com granitos metassomáticos ou de anatexia. O Complexo Gnássico Migmatítico localiza-se na porção de intermediária e apresenta migmatitos oftálmicos, com paleosoma de biotita gnaiss, biotita-hornblenda gnaiss e hornblenda gnaiss e quartzitos.

Sobre essas duas unidades encontra-se formação de Aluviões e terraços com depósitos de tálus e blocos em matriz argilosa.

As porções mais aplainadas e suave onduladas coincidem com formação de sedimentos recentes, com deposição fluvial(aluviões) com areias, siltes, argilas e cascalhos, depositados em canais, barras e planícies de inundação.

2.3. GEOMORFOLOGIA

De acordo com Atlas Geomorfológico do Estado do Paraná (Oka-Fiori *et. al*, 2006) a área de estudo está inserida predominantemente na unidade morfoestrutural denominada de Cinturão Orogênico do Atlântico. Na porção mais elevada da bacia, compreende o compartimento morfoescultural denominado de Serra do Mar. Este compartimento apresenta alta dissecação, gradiente de 1100 metros com altitudes variando entre 6m e máxima de 1160m. As formas predominantes são de topos alongados e em cristas com vertentes retilíneas e vales em “V” encaixado.

A porção plana compreende a planície litorânea e planícies fluvio-marinhas, apresentando baixa dissecação. As classes de declividade predominantes são inferiores a 6%.

2.4. PEDOLOGIA

Conforme EMBRAPA (2006), nos segmentos mais íngremes e elevados predominam os Afloramentos de Rochas, os Neossolos Litólicos e os Neossolos Regolíticos. Já nas porções intermediárias e mais baixas, em razão dos processos de adição por morfogênese, sobressaem-se as unidades de mapeamento do solo com predomínio de Cambissolos e Argissolos com a presença de algumas áreas de Latossolos.

A despeito dos pequenos gradientes altimétricos, a planície se edifica com uma paisagem muito heterogênea, onde se desenvolvem os gleysolos em sedimentos continentais e os organossolos embutidos em cotas geralmente inferiores a 50 metros.

2.5. VEGETAÇÃO

A vegetação da Bacia do Rio Ribeirão pertence ao bioma de Mata Atlântica que é classificada como Floresta Ombrófila Densa (IBGE, 2004).

O clima subtropical úmido mesotérmico, com chuvas bem distribuídas ao longo do ano, favorece a formação desta floresta tropical na Serra do Mar.

Conforme o Atlas da Vegetação do Estado do Paraná (2002) o estado atual de conservação desta floresta apresenta-se em um Estágio secundário sucessional que pode ser melhor caracterizado para área de estudo da seguinte forma:

Floresta Ombrófila Densa Submontana: compreende as formações florestais distribuídas a partir da planície litorânea até o início das vertentes da Serra do Mar. Possui uma vegetação diversificada, sobre solos profundos e situa-se entre 30 a 400 metros de altitude.

Floresta Ombrófila Densa Montana: compreende as formações florestais sobre a porção intermediária da vertente. No Paraná, esta formação corresponde a comunidades situadas entre 400 e 1.000 metros de altitude, sendo este, um limite bastante subjetivo.

2.6. CLIMA

A classificação de Koppen, define a região como sendo de clima úmido com ausência de estação seca definida.

De acordo com o IAPAR (2000) na região litorânea são registrados os maiores índices de precipitação pluviométrica do estado do Paraná. Nas porções de planície o acumulado é cerca de 2.000 mm e de 3.500 mm na vertente leste da Serra do Mar (PAULA, 2010).

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICO-METODOLÓGICA

O presente capítulo apresenta uma revisão teórica do tema abordado e está organizado em cinco partes. A primeira discorre sobre as principais definições dos movimentos de massa e sua classificação. A segunda parte discorre sobre os principais condicionantes para deflagração dos escorregamentos. A terceira apresenta um apanhado geral sobre uso de modelos e sua evolução. O quarto capítulo expõe de forma resumida a definição de fator de segurança e sua teoria. O quinto capítulo é apresentado à teoria do modelo SINMAP e sua lógica de funcionamento.

3.1. MOVIMENTOS DE MASSA

Os movimentos de massa são processos naturais que fazem parte da dinâmica das vertentes. Consiste no desprendimento e movimentação do solo, rocha e/ou vegetação ao longo de uma vertente sob ação direta da gravidade.

De acordo com Tominaga (2009) a redução da resistência dos materiais da vertente ocorre principalmente pela ação da água e gelo ou pela indução do comportamento plástico e de fluído dos solos.

Segundo Kozciak (2005) esse deslocamento de material ocorre em diferentes escalas e velocidade, conforme o plano de inclinação da vertente, litologia, atividades tectônicas, hidrogeologia, vegetação, clima entre outros. Devido às condições climáticas úmidas do sul do Brasil, o movimento de massa tem um importante papel no desenvolvimento de vertentes, ocasionado pelo intenso processo de intemperismo das rochas (FIORI 1995 por Kozciak 2005).

Segundo Guerra (2007) geralmente para a diferenciação dos movimentos de massa destacam-se o tipo de material, a velocidade e o mecanismo do movimento, o modo de deformação, a geometria de massa movimentada e o conteúdo de água.

Devido à complexidade dos critérios de análise, surgiram diversas classificações com respeito a movimentos de massa. Sharpe (1938) desenvolveu a primeira classificação, seguido por propostas mais recentes como as de Varnes (1958 e 1978), Hutchinson (1988) e Sassa (1989). No Brasil destacam-se os trabalhos de Freire (1965), Guidicini e Nieble (1984) e IPT (1991).

Conforme Tominaga et. al. (2009), a classificação proposta por Varnes (1984), apresentada no QUADRO 01, é mais utilizada internacionalmente, pois considera o tipo de movimento e material a ser transportado.

QUADRO 01 – CLASSIFICAÇÃO DOS MOVIMENTOS DE MASSA

TIPO DE MOVIMENTO DE MASSA	TIPO DE MATERIAL		
	Rocha	Solo	
		Grosseiro	Fino
Desmoronamento (avalanche, queda)	Desmoronamento rochoso	Desmoronamento de detritos	Desmoronamento terroso
Tombamento	Tombamento rochoso	Tombamento de detritos	Tombamento terroso
Escorregamento Rotacional	Escorregamento rochoso	Escorregamento de escombros	Escorregamento terroso
Escorregamento Translacional	Deslizamento de blocos rochosos	Deslizamento de bloco de escombros	Deslizamento de blocos terrosos
Corridas densas			Corridas de lama ou areia
Rastejo / Creep		Rastejo de detrito	Rastejo de solo
Complexos	Combinação de dois ou mais tipos de movimentos de massa		

FONTE: VARNES (1984)

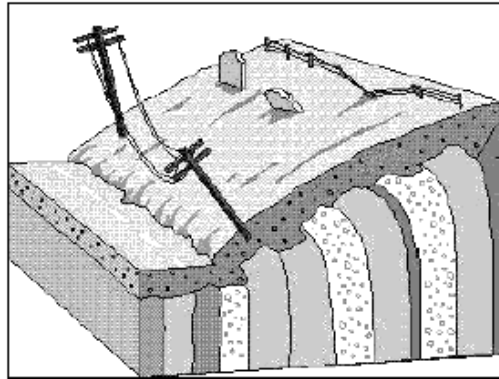
Para a Serra do Mar Paranaense, os principais movimentos de massa destacados por Augusto (1988), Fernandes (1996), Guerra (2007), entre outros, são os rastejos, escorregamentos rotacionais e translacionais, tombamento ou queda de blocos ou corridas de massa.

a) Rastejo (creep) é um movimento lento e contínuo, sem limites definidos. Ocorre devido à tensão constante aplicada durante longos períodos de tempo e pode envolver grande quantidade de material.

Segundo Guimarães et. al., (2008) o desenvolvimento destas tensões está relacionado com o processo de contração e expansão do material, ocasionado principalmente pela variação da temperatura e da umidade. Os indícios destes

movimentos podem ser observados em campo pelo escalonamento do solo, inclinação de árvores e outras curvaturas, como exemplo a Figura 02.

FIGURA 02 – ESQUEMA DE RASTEJO (*creep*)



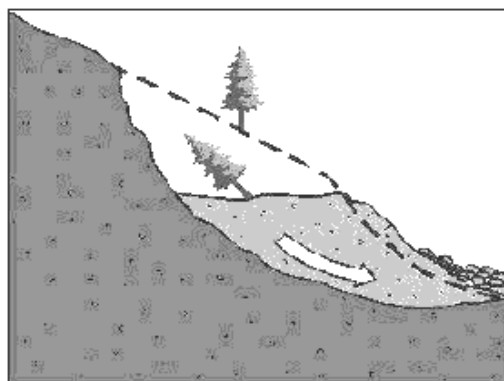
FONTE: ATKINSON (1997)

Estes movimentos não possuem uma ruptura marcante. A figura 02 apresenta postes, cercas e lápides que indicam a ocorrência deste tipo de movimento de massa em campo.

b) Escorregamento rotacional (slumps) a característica principal deste movimento é que possui uma superfície de ruptura curva, côncava para cima, ao longo da qual se dá um movimento rotacional de massa de solo (GUERRA, 2007).

As condições que mais favorecem à geração desses movimentos são devido a existência de solos espessos e homogêneos, sendo comum em vertentes compostas por materiais de origem de rochas argilas. Estes movimentos são comuns no sudeste brasileiro, devido a espessos mantos de alteração.

FIGURA 03 – ESCORREGAMENTO ROTACIONAL (*slump*)



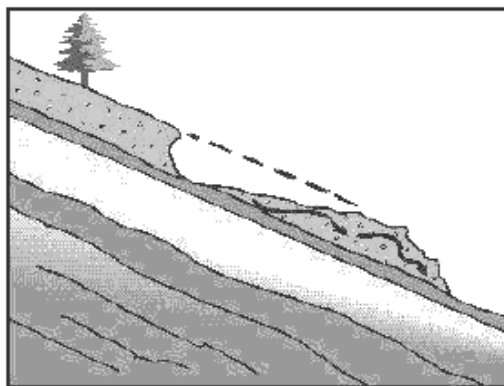
FONTE: ATKINSON (1997)

A linha tracejada da figura 03 mostra o nível da superfície da vertente antes início do processo de movimentação do solo. A flecha indica a orientação do movimento do manto de alteração que foi remobilizado.

c) Escorregamento translacional é caracterizado por apresentar um plano de ruptura abrupto, bem definido, planar, e por ser de curta duração (Guimarães et. al., 2008). Na maioria das vezes, este tipo de escorregamento é controlado por descontinuidade entre o contato solo/rocha. (BORCHARDT, 2005). Estes movimentos ocorrem durante eventos pluviométricos de alta intensidade ou duração, o que eleva a poro-pressão positiva.

De acordo com Guerra (2007) a estabilidade de vertentes sujeitas à ocorrência de escorregamentos rasos translacionais que pode ser aproximada pelo método do talude infinito proposto por (Skempton e De Lory, 1957).

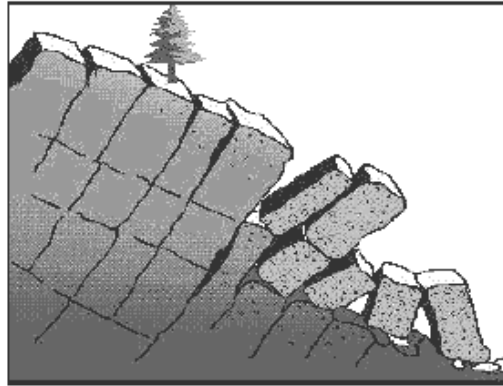
FIGURA 04 - ESCORREGAMENTO TRANSLACIONAL (*landslide*)



FONTE: ATKINSON (1997)

A figura 04 apresenta um movimento raso com forma de ruptura planar associada a heterogeneidade entre as camadas de solos e rochas que possuem entre si descontinuidades mecânicas

d) Tombamento ou Queda de Blocos são movimentos rápidos em queda livre, sem a presença de uma superfície de deslizamento. Ocorrem em vertentes íngremes de paredões rochosos e contribuem decisivamente para a formação dos depósitos de tálus. É favorecido pela presença de fraturas tectônicas ou descontinuidades e/ou alívios de tensão.

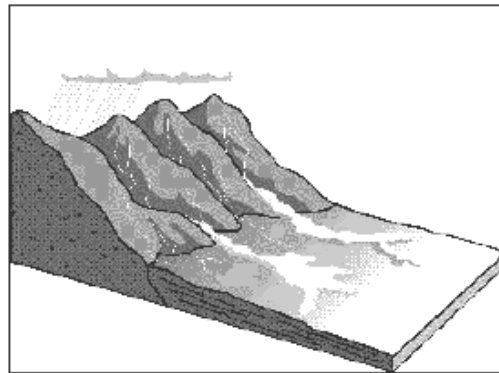
FIGURA 05 – ESQUEMA DE TOMBAMENTO (*falls*)

FONTE : ATKINSON (1997)

A figura 05 apresenta de forma esquemática as descontinuidades das rochas ocasionadas por fraturas e bandamentos. Desta maneira, estas acabam se desprendendo por efeito de gravidade e alívio de pressão.

e) Corridas de Detritos são caracterizadas por movimentos rápidos com alto poder de destruição, nos quais os materiais se comportam como fluídos altamente viscosos, mobilizando um expressivo volume de material, composto inclusive por grandes blocos.

Segundo Guerra (2007), a distinção entre corridas e escorregamentos nem sempre é fácil de ser feita em campo. A origem das corridas é vinculada a diversos processos, entre os quais destacam-se a mobilização de rochas, concentração de escorregamentos e materiais que de fácil mobilização contribuem para a formação de barramentos que quando rompidos podem atingir áreas de menor declividade, consideradas de baixo risco.

FIGURA 06 – ESQUEMA DE CORRIDA DE DETRITOS (*earthflow*)

FONTE: ATKINSON (1997)

A figura 06 mostra que massa deslocada pode atingir maiores distâncias quando este material ganha maior viscosidade e densidade quando atinge as drenagens, mesmo quando em áreas de pouca declividade.

Cabe destacar que não são comuns movimentos puros e normalmente ocorre uma mistura destes movimentos, com maior importância relativa entre uns ou outros. Conforme Fernandes & Amaral (1996), qualquer esquema proposto apresenta limitações, uma vez que na natureza a dinâmica e a gênese dos escorregamentos tendem a ser mais complexas, dificultando assim os limites entre uma classe e outra.

3.2. CONDICIONANTES DOS ESCORREGAMENTOS

A instabilização de vertentes é condicionada por complexas relações entre os fatores geológicos, geomorfológicos, climáticos, antrópicos, entre outros.

Com relação à geologia consideram-se a litologia da área e suas características estruturais. O tipo de rocha define a permeabilidade, portanto, o tipo de drenagem e textura, conseqüentemente, sua resistência ao intemperismo. A inclinação das camadas, fraturas e planos de falhas atuam no processo de instabilização, principalmente quando apresentam o mesmo sentido de inclinação formando planos potenciais de escorregamentos (FIORI, 1995).

A geomorfologia inclui as formas de vertentes e as variáveis morfométricas, como dissecação, declividade, amplitude do relevo, etc.

Conforme Crepani et. al., (1999) a drenagem exerce papel fundamental sobre o modelado do relevo (formas de vertentes e vales), sendo uma variável especialmente importante em regiões tropicais úmidas. A densidade de drenagem fornece a intensidade da dissecação do relevo.

KOZCIAK (2005) aponta que a declividade fornece a medida de inclinação (graus percentual) do relevo em relação ao plano do horizonte. Assim, a capacidade de transporte de massas sólidas e líquidas, é diretamente proporcional ao ângulo da vertente.

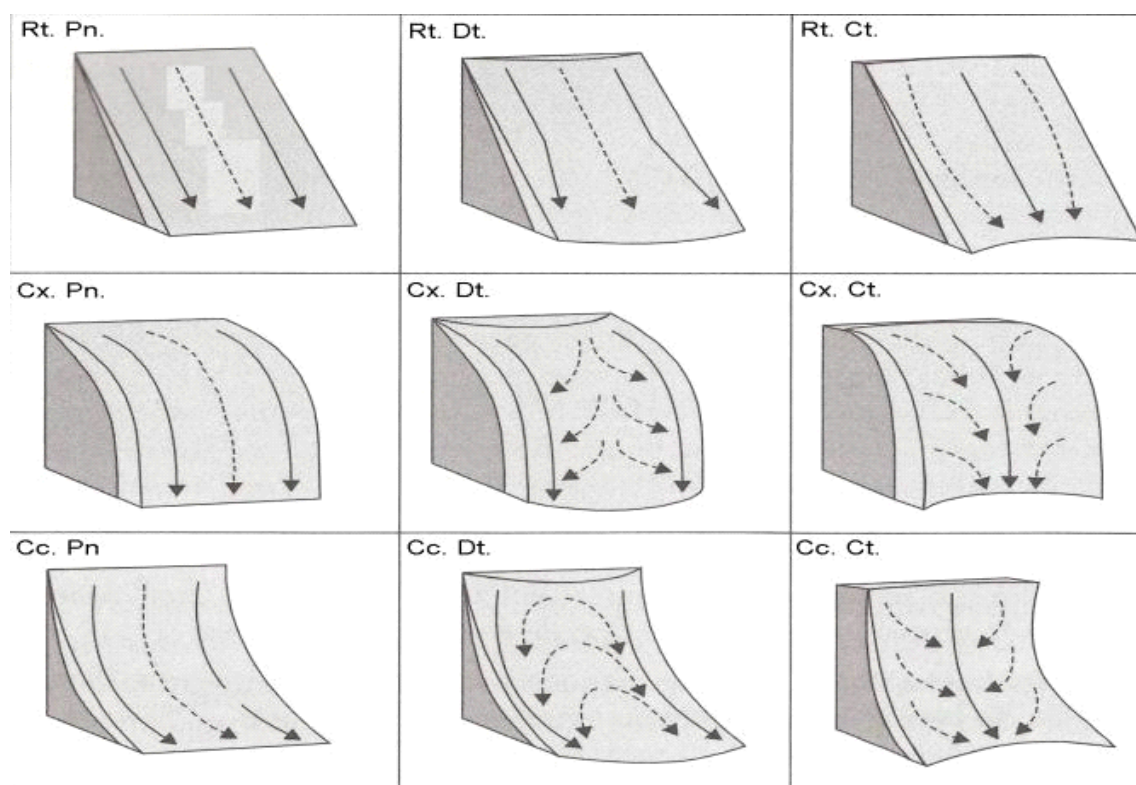
Segundo Fernandes e Amaral (1996) a declividade acima de 30° apresenta riscos de escorregamentos mais freqüentes. No entanto, acima de 60° estes riscos são minimizados devido pouca formação de solo propiciados pela própria inclinação da vertente.

De acordo com Kozciak (2005) o atributo declividade deve sempre estar associado a outros atributos existentes na área para a avaliação da maior ou menor possibilidade da ocorrência de movimentos de massa gravitacionais.

Neste sentido, a orientação das vertentes pode favorecer a exposição à pluviosidade, insolação e ventos, causando diferenças na umidade retida na vertente.

Em relação à forma das vertentes, existem três tipos básicos: as formas côncavas, convexas e retilíneas. Estas formas encontram-se combinadas na natureza, representadas na FIGURA 07.

FIGURA 07 - FLUXO DA ÁGUA NO PLANO DE CURVATURA (SETAS PONTILHADAS) E FLUXO DA ÁGUA NO PERFIL DA CURVATURA DAS VERTENTES (SETAS CONTÍNUAS)



FONTE: ADAPTADO DE HUGGET (1975)

Rt. Pn - Perfil de curvatura retilíneo e plano de curvatura planar;
 Rt. Dt - Perfil de curvatura retilíneo e plano de curvatura divergente;
 Rt. Ct - Perfil de curvatura retilíneo e plano de curvatura convergente;
 Cx. Pn. - Perfil de curvatura convexo e plano de curvatura planar;
 Cx. Dt. - Perfil de curvatura convexo e plano de curvatura divergente;
 Cx. Ct. - Perfil de curvatura convexo e plano de curvatura convergente;
 Cc. Pn. - Perfil de curvatura côncavo e plano de curvatura planar;
 Cc. Dt. - Perfil de curvatura côncavo e plano de curvatura divergente;
 Cc. Ct. - Perfil de curvatura côncavo e plano de curvatura convergente.

FERNANDES *et al.* (2007) destaca que a forma tridimensional das vertentes podem favorecer ou dispersar a concentração de água. Nas seções côncavas

devido a convergência de fluxos de d'água e sedimentos são mais favoráveis a ocorrência de escorregamentos.

O clima relaciona-se principalmente a precipitação e suas consequências sobre os processos morfogenéticos e pedogenéticos.

Segundo Ab'Sáber (2003) nos domínios morfoclimáticos tropicais, a elevada umidade provoca o encharcamento do solo favorecendo os movimentos de massa. A intensidade da chuva em mm/hora corresponde ao potencial erosivo que pode causar desagregação do material, como solo ou rocha.

Analizando os escorregamentos ocorridos por um período de 30 anos na Serra do Mar, em Cubatão, Tatiana *et. al.*, (1987) *apud* Tominaga (2009) estabeleceram uma correlação numérica entre a chuva acumulada no período de quatro dias que ocasiona a saturação do solo e as precipitações horárias que provocam escorregamentos.

Quanto ao papel da vegetação, de maneira geral, ela protege o solo dos fatores que condicionam os movimentos de massa, retendo o volume de água precipitado e reduzindo a quantidade de energia que chega ao solo durante os eventos de precipitação.

Segundo Rodrigues (2002) a vegetação intercepta e retém a parcela da água precipitada nas partes aéreas (folhas, flores e galhos). A serrapilheira retém parte da água que alcança a superfície reduzindo momentaneamente a infiltração e refreando o escoamento superficial. O sistema radicular, ao penetrar nas camadas do solo produz uma estruturação ou reforço adicional que resulta no aumento da resistência ao cisalhamento, além da redução da susceptibilidade a erosão.

Apesar disso, Kozciak (2005) adverte que com relação aos movimentos coletivos de massa existem algumas divergências sobre o papel da vegetação na estabilidade das vertentes, como efeito alavanca promovido pela força dos ventos e sobrecarga de peso da vegetação sobre a vertente.

Fiori e Borchardt (1997), analisando o comportamento e a influência da vegetação na estabilidade das vertentes da Serra do Mar no litoral paranaense, verificaram que o efeito da vegetação nos índices de segurança é maior em vertentes pouco inclinadas, diminuindo gradativamente com o aumento da declividade.

As características físicas do solo influenciam a ação de processos erosivos e movimentos de massa, devido a sua textura, estrutura, permeabilidade e densidade.

A textura refere-se à proporção relativa de argila, silte e areia no solo. Desta forma, sua composição influencia na capacidade de infiltração e absorção de água. A permeabilidade indica a facilidade com que sólidos (raízes), líquidos e gases passam no espaço poroso do solo. A porosidade indica o volume de poros do solo ou da rocha, incluindo macroporos e microporos ocupados pelo ar e pela água. A porosidade e a permeabilidade são inversamente proporcionais à densidade, que representa a relação entre o volume e a massa total do solo (FIORI e CARMIGNANI, 2009).

A condutividade hidráulica do solo se traduz pela facilidade que a água se movimenta ao longo do perfil do solo, favorecendo a elevação do lençol freático e consequentemente o aumento do peso da massa de solo e poro-pressões positivas.

KOZCIAK (2005) destaca que outros dois parâmetros do solo devem ser levados em consideração na análise de movimentos de massa: a resistência dos solos e os índices físicos.

A resistência ao cisalhamento de um solo pode ser definida como a máxima tensão de cisalhamento que o solo pode suportar sem sofrer ruptura.

Os parâmetros determinantes da resistência ao cisalhamento são o ângulo de atrito e a coesão, que variam dependendo das características do solo e são de grandezas inversamente proporcionais.

Segundo Fiori e Carmignani (2009) o ângulo de atrito é o ângulo máximo que um determinado material pode assumir sem que haja o rompimento de seu estado inercial.

De acordo com Tabalipa (2008) e Borchardt (2005) a coesão é a força exercida entre as partículas como resultado das atrações intermoleculares (forças de Van Der Waals) que agem nos pontos de mais próximo contato e das repulsões eletrostáticas dos íons dispersos na dupla camada que envolve as partículas coloidais.

A coesão é uma característica típica de solos muito finos (argilas e siltes), distinguindo-se a *coesão aparente*, resultante da pressão capilar da água contida no solo, e que age como se fosse uma pressão externa de sucção, e a *coesão verdadeira*, devido às forças eletroquímicas de atração de partículas de argila (CAPUTO, 1988).

O estado do solo pode variar dependendo da quantidade de ar e água presentes no solo, por sua vez pode estar preenchido com água, ar ou ambas. Com

a redução do volume de vazios sua resistência tende a aumentar. Apesar disso, a água absorvida não aumenta a coesão, mesmo tendo elevada viscosidade.

Para a identificação do estado do solo, empregam-se os índices que correlacionam os pesos e volumes a três fases conforme Pinto (2002) *apud* Kozciak (2005). São eles: umidade, índices de vazios, porosidade, grau de saturação, peso específico dos sólidos, peso específico da água, peso específico natural, peso específico aparente seco, peso específico aparente saturado, peso específico submerso.

A interação das variáveis e parâmetros até aqui mencionados torna possível a indicação dos locais aonde existe maior propensão a ocorrência de processos de movimentos de massa.

3.3. MODELOS

Dentre os fenômenos envolvidos em desastres naturais no Brasil, os escorregamentos têm sido responsáveis pelo maior número de vítimas fatais e de importantes prejuízos materiais (TOMINAGA *et. al.*, 2009).

Em virtude da carência ou até mesmo da inexistência de dados geotécnicos, bases cartográficas de maior detalhe e até mesmo registro inventários de cicatrizes de escorregamentos, muitos pesquisadores, planejadores e geógrafos encontram dificuldades para o desenvolvimento de suas pesquisas com vistas ao entendimento e previsão destes processos naturais.

Neste sentido, a comunidade científica vem dando ênfase ao desenvolvimento de diferentes modelos ambientais, dentre estes alguns destinados a previsão de escorregamentos.

Conforme Christofolletti (2009), a palavra modelo possui muitas nuances em seu significado. De modo geral pode ser compreendido como sendo “qualquer representação simplificada da realidade”. De modo prático, possibilita reproduzir ou reconstruir parte da realidade, prever seu comportamento, sua transformação e possível evolução a partir de uma série de dados e parâmetros pré-determinados que possam ser ajustados pelo pesquisador. Para tanto, é importante salientar que os modelos são aproximações altamente subjetivas, por não incluírem todas as observações ou medidas associadas.

Para superar os problemas já mencionados, costuma-se utilizar modelos de simulação e de síntese como instrumentos para gerar sequências artificiais de dados a fim de serem aplicadas na racionalização das análises e pesquisas.

Segundo Christofolletti (2009) a simulação hidrológica pode ser definida como a descrição matemática da resposta de um sistema hidrológico de recursos hídricos a uma série de eventos durante pré-determinados períodos de tempo.

Os modelos de síntese, como exemplo, são utilizados em séries temporais com a finalidade de gerar sequências sintéticas de dados sobre precipitação ou escoamento fluvial, podendo ser empregados para o preenchimento de lacunas de dados inexistentes.

Em virtude do aperfeiçoamento e da ampla difusão de técnicas computacionais nas últimas décadas, ocorreu o desenvolvimento de muitos procedimentos de simulação e melhoria de técnicas para predição de escorregamentos. Considerando a natureza diversificada dos modelos de previsão que foram desenvolvidos, também surgiram variadas tentativas de classificá-los, proliferando o uso de adjetivos e de critérios diferenciados.

De acordo com Guimarães et. al., *in* Florenzano (2008) para os movimentos de massa, os principais métodos de previsão podem ser classificados em quatro grupos:

- a) Análise da distribuição dos movimentos de massa no campo;
- b) Análise baseada em mapeamentos geomorfológicos e/ou geotécnicos;
- c) Aplicação de modelos com bases estatísticas;
- d) Aplicação de modelos matemáticos;

Segundo Fernandes (1996) a modelagem matemática é cada vez mais utilizada para preconizar eventos que ocorrem na natureza. Esta ferramenta possibilita desenvolvimento de modelos baseados em dados físicos que reproduzem a dinâmica dos fenômenos naturais.

Desta maneira, os modelos relacionados à análise de estabilidade de vertentes são desenvolvidos com base em formulações matemáticas. Como exemplo, pode-se citar as análises baseadas no equilíbrio-limite, tais como: talude-infinito, Bishop, Fellenius, Spencer, entre outros, que são amplamente empregadas atualmente.

Para a comparação da estabilidade de vertentes em condições diferentes de equilíbrio-limite, defini-se o fator de segurança (FS) como a resultante das forças solicitantes e resistentes aos escorregamentos.

3.4. FATOR DE SEGURANÇA

Segundo Fiori e Carmignani (2009), do ponto de vista teórico, uma vertente se apresenta como uma massa de solo submetida a três campos de força distintos: forças devido ao peso dos materiais, forças devido ao escoamento da água e forças devido à resistência ao cisalhamento.

O estudo da estabilidade, leva em conta o equilíbrio entre essas forças, uma vez que as duas primeiras se somam e tendem a movimentar a massa de solo vertente abaixo, enquanto a última atua como freio a essa movimentação.

Para comparar a estabilidade das vertentes em condições diferentes de equilíbrio-limite, define-se um fator de segurança (FS), como a razão entre a resultante das forças resistentes ao escorregamento e das forças solicitantes ao movimento. A análise de equilíbrio limite considera que as forças que tendem a induzir a ruptura são exatamente balanceadas pelos esforços de resistência.

No caso, o fator de segurança (FS) é dado por:

$$FS = \text{forças resistentes} / \text{forças solicitantes}$$

Segundo Kozciak (2005) existem diversas formas de cálculo de índices de segurança, desde a mais simples, envolvendo apenas o ângulo de atrito e inclinação da vertente, até as mais complexas combinações envolvendo vegetação, propriedades mecânicas, física dos solos, presença da água, planos de fraqueza, entre outros.

De acordo com Guimarães et. al. in Florenzano (2008) as análises de talude infinito tem sido amplamente aplicadas para averiguação da estabilidade de vertentes naturais, onde a espessura do solo é muito menor que o comprimento da vertente e o plano de ruptura é aproximadamente paralelo a superfície da vertente.

Normalmente se considera que quando o fator de segurança é menor ou igual a 1, indica a ruptura dos maciços, sendo considerado seguro, por exemplo, o talude que apresenta fator de segurança maior que 1.5 (NBR 11.682, 1991).

Desta forma, muitas metodologias têm sido desenvolvidas para a predição de movimentos de massa a partir de modelagens com apoio de sistemas de informação Geográfica (SIG). Estas podem ser subdivididas com base em modelos empíricos e os que se baseiam em leis físicas.

Modelos numéricos são muitas vezes utilizados para a identificação preliminar das vertentes sujeitas a escorregamentos translacionais, como os empregados por Borga *et. al.*, (1998), Morrissey *et. al.*, (2001) e Guimarães *et. al.*, (2003) *apud* Guimarães *in* Florenzano *et. al.* (2008)

Nesta perspectiva, vários modelos de escorregamento translacionais foram desenvolvidos com base na equação de equilíbrio-limite, como o SHALSTAB (Montgomery e Dietrich, 1994) e o SINMAP (Pack *et. al.*, 1998, Pack *et. al.*, 2001 e Pack e Tarboton, 2004). Estes dois modelos combinam pressupostos de hidrologia no estado estacionário com o modelo de talude infinito para quantificar a estabilidade de vertentes.

3.5. TEORIA SINMAP (*Stability Index Mapping*)

A finalidade da teoria SINMAP (Mapeamento de Índice de Estabilidade) implementada como um *plugin* no software ArcView 3.2 (ESRI,1996) é fornecer uma ferramenta de mapeamento com o objetivo de indicar a estabilidade das vertentes.

Existem muitas abordagens para avaliar a estabilidade de taludes e escorregamentos translacionais, como (Sidle et. al, 1985;. Dietrich et. al., 1986;. Montgomery e Dietrich, 1988; Montgomery e Dietrich, 1989; Carrera et. al., 1991;. Dietrich et. al., 1992;. Sidle, 1992;. Dietrich et. al., 1993; Montgomery e Dietrich, 1994; Wu e Sidle, 1995, Pack, 1995) *apud* Pack(2005).

Para o desenvolvimento destas abordagens é notório o crescente uso de modelos digitais do terreno (MDT) que possibilitam a elaboração de métodos que podem quantificar os atributos topográficos em sistemas de informação geográfica (SIG), deste modo, relacioná-los com a instabilidade das vertentes e com os escorregamentos. (PARK, 2005)

O modelo de estabilidade de vertentes do SINMAP é semelhante ao SHALSTAB desenvolvido por Montgomery e Dietrich (1994), tendo como base a teoria do talude infinito que considera o plano de escorregamento retilíneo. Além disso, combina o modelo hidrológico estacionário que permite identificar a quantidade de chuva requerida para deflagrar os escorregamentos.

Desta maneira, o SINMAP aplica-se a fenômenos de escorregamentos translacionais rasos controlados pela convergência do fluxo de águas subterrâneas rasas, não sendo indicado para escorregamentos rotacionais e quedas blocos.

De acordo com Pack (2005) o modelo não se destina a ser usado na ausência de informações de campo necessárias para a calibração e é mais produtivo quando implementado em conjunto com outros métodos de mapeamento de estabilidade.

Os dados necessários para implementar a teoria incluem propriedades do solo e do clima que podem ser altamente variáveis no espaço e no tempo. A teoria não requer entrada numericamente precisa e aceita as gamas de valores que representam essa incerteza.

O fator de segurança (FS) utilizado por este modelo é apresentado na equação 01.

$$FS = \frac{Cr + Cs + \cos 2\theta [\rho_s \cdot g(D - Dw) + (\rho_s \cdot g - \rho_w \cdot g)Dw] \tan \varphi}{D \cdot \rho_s \cdot g \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta} \quad (01)$$

Onde:

Cr = coesão da raiz [N/m^2]

Cs = coesão do solo [N/m^3],

θ = declividade da vertente [graus],

ρ_s = densidade do solo úmido [kg/m^3]

ρ_w = densidade da água [kg/m^3]

g = aceleração da gravidade [9.81 m/s^2],

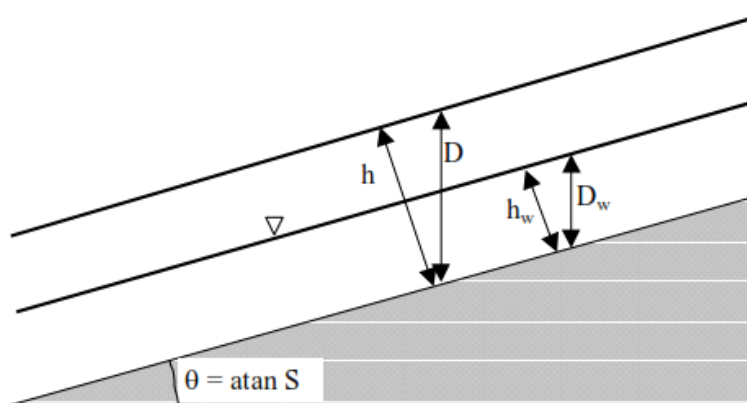
D = profundidade vertical do solo [m]

Dw = nível do lençol freático dentro da camada de solo [m]

φ = ângulo de atrito interno do solo [graus]

A figura 08 ilustra a geometria assumida pela equação (01)

FIGURA 08 – ESQUEMA DA GEOMETRIA ADOTADA PELO SINMAP



A coesão adimensional do solo é representada pela equação 01-1:

$$C = \frac{Cr + Cs}{h \cdot \rho_s \cdot g} \quad (01-1)$$

Com a equação 01-2 obtêm-se a razão entre a densidade da água e do solo.

$$r = \frac{\rho_w}{\rho_s} \quad (01-2)$$

A equação 01-3 é dada a umidade relativa,

$$w = \frac{Dw}{D} = \frac{hw}{h} \quad (01-3)$$

A relação entre a espessura do solo (h) e a sua profundidade (D) é dada pela equação 01-4:

$$h = D \cos \theta \quad (01-4)$$

Desta maneira, tem-se Fator de Segurança (FS) da seguinte maneira:

$$FS = \frac{c + \cos \theta [1 - wr] \tan \phi}{\sin \theta} \quad (01-5)$$

Assim, o índice de estabilidade (SI) no SINMAP é definido como a probabilidade de que um local é estável assumindo distribuições uniformes dos parâmetros ao longo destas faixas de incerteza, onde os valores variam entre 0 (mais instável) e 1 (menos instável).

A classe sugerida pelo SINMAP apresentada no QUADRO 02 é definida conforme a British Columbia (Província de British Columbia, 1995) que solicita que as classes de estabilidade sejam amplamente identificadas e mapeadas, com base em informações relativamente grosseiras, para identificação rápida das regiões onde as avaliações mais detalhadas são mais necessárias.

Condição	Classe	Estabilidade Prevista	Intervalo dos Parâmetros	Possível influência de fatores não modelados
$SI > 1.5$	1	Estável	Instabilidade não prevista	São necessários fatores desestabilizantes significativos para gerar instabilidade
$1.5 > SI > 1.25$	2	Estabilidade moderada	Instabilidade não prevista	São necessários fatores desestabilizantes moderados para gerar instabilidade
$1.25 > SI > 1.0$	3	Estabilidade baixa	Instabilidade não prevista	São necessários fatores desestabilizantes mínimos para gerar instabilidade
$1.0 > 0.5$	4	Limiar inferior de instabilidade	Combinação pessimista prevê instabilidade	Fatores desestabilizantes não são necessários para gerar instabilidade
$0.5 > SI > 0.0$	5	Limiar superior de instabilidade	Combinação otimista prevê estabilidade	Fatores estabilizantes podem gerar estabilidade
$0.0 > SI$	6	Instável	Estabilidade não prevista	Fatores estabilizadores são necessários para gerar estabilidade

FONTE: PACK (2005)

O SINMAP é destinado para esta finalidade e sua seleção de pontos de interrupção (1,5, 1,25, 1, 0,5, 0,0) é um julgamento subjetivo, exigindo a interpretação em termos de definições de cada classe.

No exemplo dado no QUADRO 02, adotou-se 'Estável', 'Moderadamente estável', e 'Quase estável' para classificar as regiões que, segundo o modelo, não deve falhar com parâmetros mais conservadores dentro dos intervalos especificados.

Utiliza-se as classes 'Limiar inferior' e 'Limiar superior' para caracterizar regiões onde, de acordo com a incerteza dos parâmetros suas quantificações variam no modelo, onde a probabilidade de instabilidade é inferior ou superior a 50%, respectivamente. A instabilidade pode surgir simplesmente devido a uma

combinação de valores dos parâmetros dentro dos limites com que a incerteza e a variabilidade pode ser quantificada. A classe 'Instável' é definida para caracterizar regiões onde, de acordo com o modelo, a inclinação deve ser instável para todos os parâmetros dentro dos intervalos especificados. Onde tais vertentes ocorrem em campo, estes são mantidos no lugar por forças não representadas no modelo, ou o modelo é inadequado, como no caso de afloramentos rochosos.

A abordagem do SINMAP interpreta o modelo hidrológico como sendo a espessura do solo perpendicular à inclinação especificada, ao invés de profundidade do solo, medida na vertical.

Segundo Pack (2005) essa ferramenta é útil tanto para o mapeamento de reconhecimento de nível (1:20.000) como para mapeamentos detalhados (1:20.000 a 1:5000), conforme definido pelo Código de Práticas Florestais da British Columbia. O resultado do índice de estabilidade não deve ser interpretado como numericamente preciso, sendo mais adequadamente interpretado como em termos de risco relativo.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1.1. BASES CARTOGRÁFICAS

Para realização deste trabalho foram utilizadas as bases cartográficas digitais disponíveis no sítio do ITCG (INSTITUTO DE TERRAS, CARTOGRAFIA E GEOCIÊNCIAS DO PARANÁ, 2009). Os planos de informação utilizados foram:

- Pontos Cotados
- Curvas de Nível
- Drenagem da Bacia hidrográfica

Todos os dados estão disponíveis na escala 1:25.000, com projeção UTM, DATUM SAD 69 Fuso 22s. As curvas de nível apresentam as linhas com equidistância de 20 metros. A delimitação da bacia foi realizada com o auxílio do software ARCGIS 9.3.1 (ESRI,2006) seguindo a interpretação das curvas de nível e drenagem.

4.1.2. PARÂMETROS PEDOLÓGICOS

Os parâmetros geotécnicos do solo utilizados basearam-se nos ensaios de cisalhamento direto realizados por Kozciak (2005) na bacia hidrográfica do rio Marumbi, sendo distribuídos de acordo com as unidades de mapeamento de solos, conforme tabela 1:

TABELA 01 – PARÂMETROS PEDOLÓGICOS

Unidades de solos	Ângulo de Atrito	Peso natural do solo (g/cm ³) (γ_{nat})	Coesão (kPa)
Gleissolos	25,5º	1,845 g/cm ³	10,9 kPa
Latossolos	21,7º	1,716 g/cm ³	13,5 kPa
Cambissolos	23,2º	1,638 g/cm ³	14,8 kPa
Neossolos Litólicos	23,5º	1,729g/cm ³	17,0kPa

Apesar das amostras terem sido coletadas fora da área do presente estudo, são representativas por tratar-se de uma bacia que apresenta características do meio físico muito semelhante, como geologia, geomorfologia, solos, vegetação e clima.

A resistência ao cisalhamento de um solo pode ser definida como a máxima tensão ao cisalhamento que o solo pode suportar sem sofrer ruptura, ou a tensão de cisalhamento do solo no plano em que a ruptura estiver acontecendo (FIORI e CARMIGNANI (2009).

Determinar a resistência de um solo é traçar sua envoltória de resistência, ou seja, os parâmetros c e ϕ da equação de resistência.

4.1.3. VEGETAÇÃO E VENTO

Para os parâmetros que indicam a influência da vegetação e vento, foram adotados valores fixos para toda a região da bacia, baseados em valores médios, sendo que para a Serra do Mar os valores de atrito de raízes são da ordem de 3,0KPa (WOLLE & PEDROSA, 1981) e a pressão dos ventos na copa das árvores são da ordem de 1,0 kPa (FENDRICH & FERREIRA, 1995).

4.1.4. INVENTÁRIO DE CICATRIZES DE ESCORREGAMENTOS

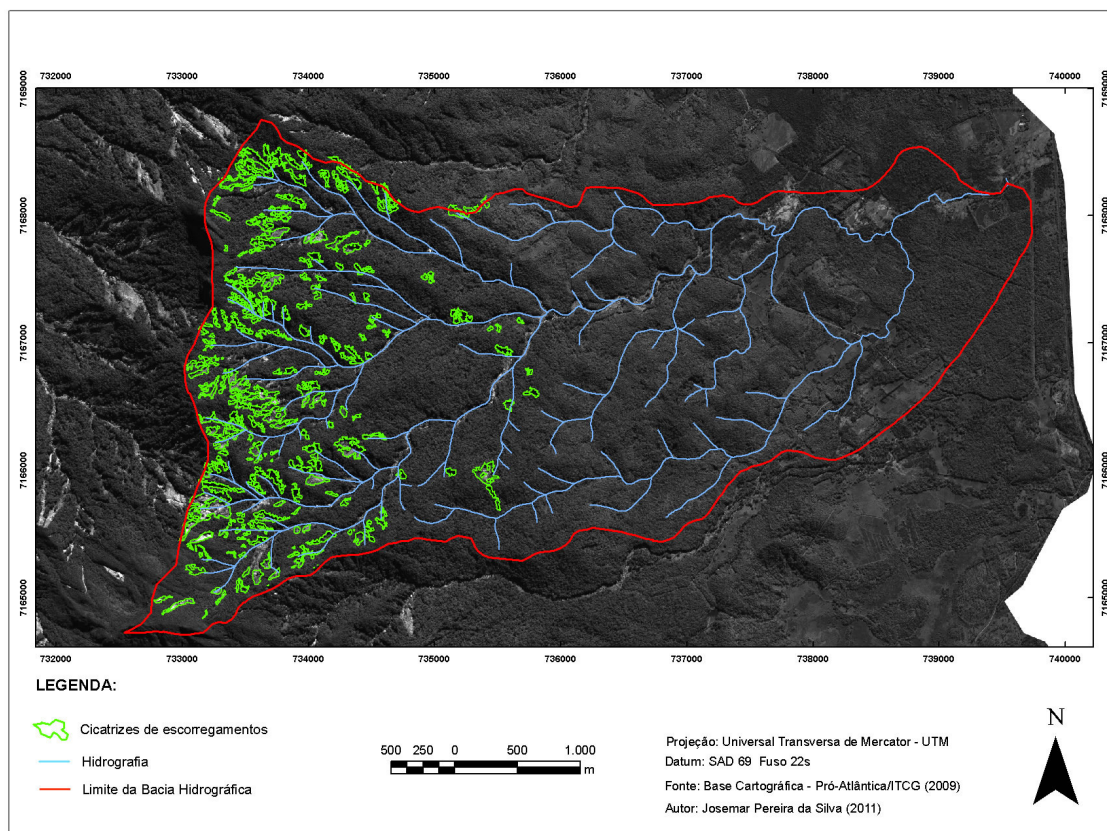
Conforme Guimarães et. al., in Florenzano (2008), os mapas inventários tem a finalidade de representar a distribuição espacial dos movimentos de massa. Além disso, estes mapas refletem a densidade dos escorregamentos no campo, seja para um único evento ou para uma série temporal de algumas décadas. (FERNANDES et. al., 2001).

O mapeamento dos processos de escorregamentos que ocorreram no evento do dia 11 de março de 2011 nos municípios de Morretes/Paranaguá (FIGURA 09) foi realizado com base na interpretação visual. Como suporte para a delimitação deste evento foi empregado a imagem de satélite Wordview 1 cujo o pixel equivale a 0,5 metros. Para o tratamento da imagem de satélite foi usado o software ENVI 4.7 (ITT, 2009).

A identificação dos movimentos de massa foi realizada com base na textura, cor, rugosidade, feição, padrões e geometria dos diferentes processos. Este trabalho

foi realizado pelo Nugeo (Núcleo de Geoprocessamento) que é vinculado ao departamento de Geologia/UFPR. Foram identificadas e digitalizadas cicatrizes de escorregamentos, corrida de detritos e áreas de depósitos utilizando o software ArcGis 9.3.1 (ESRI 2005).

FIGURA 09 – INVENTÁRIO DAS CICATRIZES DE ESCORREGAMENTOS



Nota: No mapa é possível observar que as cicatrizes em verde se concentraram principalmente na área da bacia que apresenta as maiores declividades.

Neste trabalho, foram consideradas apenas as cicatrizes dos escorregamentos (FIGURA 09) ocorridos na área de estudo com a finalidade de validar as técnicas de mapeamento a serem aplicadas. Para esta bacia foram identificadas 232 cicatrizes de escorregamentos que foram vetorizadas em forma de poligonal, que representa uma área de 824.900 m².

Para o cruzamento do inventário de escorregamentos com os mapas temáticos de índice de estabilidade, primeiramente procedeu-se a conversão do formato vetorial (original) para o formato *grid*.

4.2. MÉTODOS

A elaboração dos mapas de índice de estabilidade da bacia do Rio Ribeirão em ambiente SIG foi realizado em quatro etapas.

A primeira etapa consistiu na preparação dos temas básicos conforme as bases cartográficas disponíveis em formato DWG para a aplicação dos métodos adotados.

Na segunda etapa foram realizados os procedimentos metodológicos para aplicação do índice de segurança proposto por Fiori e Carmignani (2009), denominado como método (1).

A terceira etapa, com apoio dos temas base gerados nas etapas anteriores aplicou-se o modelo SINMAP, proposto por Park (1998), denominado de método (2).

Após os procedimentos finalizados, na quarta etapa procedeu-se com o cruzamento dos mapas temáticos de índice de estabilidade com o inventário de escorregamentos, bem como a tabulação e análise de todos os resultados.

4.2.1. PRIMEIRA ETAPA

Esta etapa consistiu na elaboração do modelo digital de terreno (MDT) e do mapa de solos a partir dos arquivos vetoriais em formato DWG disponíveis, sendo eles: curvas de nível, drenagem e pontos cotados. Primeiramente foi necessário exportar os arquivos DWG para o formato *shapefile*. Em seguida, foram realizados os ajustes pertinentes pelo NUGEO. O modelo digital de terreno (MDT) foi gerado em forma de *grid* onde cada pixel da grade equivale a 5x5 metros. Para isso, foi utilizado o método “topo to raster” do software ARCGIS 9.3.1.

Como os dois métodos utilizam o MDT para a geração dos mapas temáticos de Índice de Estabilidade (SI), torna-se fundamental considerar o efeito de borda para a construção de um modelo hidrologicamente consistente.

A partir do MDT foi gerada a declividade utilizando a ferramenta *slope* do ArcGIS 9.3.1 conforme intervalos mencionados na tabela 02. Estes intervalos foram

utilizados para geração do mapa de solos, conforme metodologia proposta por SILVEIRA (2010).

TABELA 02 – INTERVALOS ADOTADOS CONFORME TIPOLOGIA DO SOLO

Unidade preliminar de solo	Declividade	Espessura
Gleissolo	0 - 5%	200 cm
Latossolos + Argissolos	5 - 12%	300 cm
Cambissolos	12 – 35%	100 cm
Neossolos + Cambissolos	35 – 75%	50 cm

Devido à inexistência de dados amostrais sobre algumas tipologias de solos da bacia do Ribeirão, foram adotadas médias entre as classes sobrejacentes e inferiores para substituir os dados ausentes.

4.2.2. SEGUNDA ETAPA

O primeiro procedimento metodológico deste trabalho, denominado de método (1), segue a proposta da equação 9-22 de fator de segurança proposta por Fiori e Carmagnani (2009). Este método adota o plano de escorregamento posicionado abaixo do alcance das raízes, e é executado em ambiente SIG com o uso da tabulação cruzada por álgebra de mapas do software ARCGIS 9.3.1. A fórmula adotada é denominada como equação (02) sendo descrita abaixo:

$$F_s = \frac{C_s + \left[\left(\gamma_{nat} - \frac{h_w}{h} \gamma_a \right) h \cos i + \sigma_a \cos i \right] \tan \varphi}{(h \gamma_{nat} + \sigma_a) \sin i + \sigma_{ve}} \quad (02)$$

Onde:

FS = Fator de segurança

C_s = Coesão do solo.

γ_{nat} = Peso específico natural.

h_w = Altura da zona de solo saturado, perpendicular à vertente.

h = Profundidade do solo, perpendicular à vertente.

γ_a = Peso específico da água.

i = Inclinação da vertente.

σ_a = Resistência devido ao atrito das raízes no plano de movimentação.

φ = Ângulo de atrito interno do solo.

σ_{vs} = Pressão exercida pelo vento sobre uma cobertura vegetal.

A discretização adotada nas classes do índice de estabilidade são apresentadas no QUADRO 03:

QUADRO 03 – ÍNDICE DE ESTABILIDADE ADOTADO

Classe (FS)	Índice de Estabilidade
0 - 1	Instável
1 – 1,25	Muito Baixa Estabilidade
1,25 -1,50	Baixa Estabilidade
1,5 – 2,0	Moderada Estabilidade
FS > 2,0	Estável

Estas classes foram determinadas conforme o limite do fator de segurança sendo ($FS = 1$), onde a condição de equilíbrio limite do fator de segurança é igual à unidade.

Neste sentido, os valores maiores que 1 indicam que as forças resistentes são maiores que as forças solicitantes, e portanto, a vertente estará em equilíbrio. Neste trabalho, optou-se em utilizar às classes superiores a ($FS > 1,5$) como áreas de potencial estabilidade visando uma maior margem de segurança.

Para aplicação da equação (02) do Fator de Segurança (FS), primeiramente foram gerados os planos de informação base utilizando os parâmetros e materiais disponíveis.

Com o emprego da ferramenta reclassify do software ArcGIS 9.3.1 (ESRI, 2006) foram gerados os temas espessura do solo, peso do solo natural, coesão dos

solos e ângulo de atrito com base na área de calibração do tema solos, conforme os parâmetros adotados nas tabelas 01 e 02.

Os valores de σ_a e σ_{vs} são respectivamente 3,0 kPa (WOLLE & PEDROSA, 1981) e 1,0 kPa (FENDRICH & FERREIRA, 1995).

Para razão hw/h foi adotado o valor de 1 para esta equação, levando em consideração a saturação completa do solo durante os eventos de escorregamentos.

Finalmente, para a realização do cálculo de fator de segurança (FS) foi utilizado a ferramenta Raster Calculator do software ArcGIS 9.3.1 (ESRI, 2006). Com o resultado do cálculo com base nos parâmetros adotados foi possível confeccionar o mapa de índice de estabilidade (SI), onde cada pixel representa um grau de estabilidade e instabilidade diferente a partir da equação aplicada. Depois disso os dados espaciais foram convertidos em formato de tabelas para a quantificação dos resultados.

4.2.3. TERCEIRA ETAPA

O método (2) seguiu o roteiro indicado pelo manual do software SINMAP (PACK, 1998), disponível no sítio oficial do mesmo.

O primeiro procedimento a ser executado nesta etapa foi carregar o Modelo Digital de Terreno (MDT) no software de ArcView 3.2 (ESRI, 1996). Neste método, as variáveis topográficas são calculadas automaticamente a partir do MDT.

Os outros parâmetros de entrada são reconhecidos por serem incertos, ou seja, são especificados para o SINMAP em termos de limites máximos e mínimos.

Como o software SINMAP (PACK, 1998) foi projetado como um *plugin* do software ArcView 3.2 (ESRI, 1996) que executa rotinas em ambiente SIG de forma sistematiza e automática, este roteiro metodológico considerou os parâmetros máximos e mínimos de entrada conforme a TABELA 03.

TABELA 03 – PARAMETROS DE ENTRADA PARA A APLICAÇÃO DO MÉTODO (2)

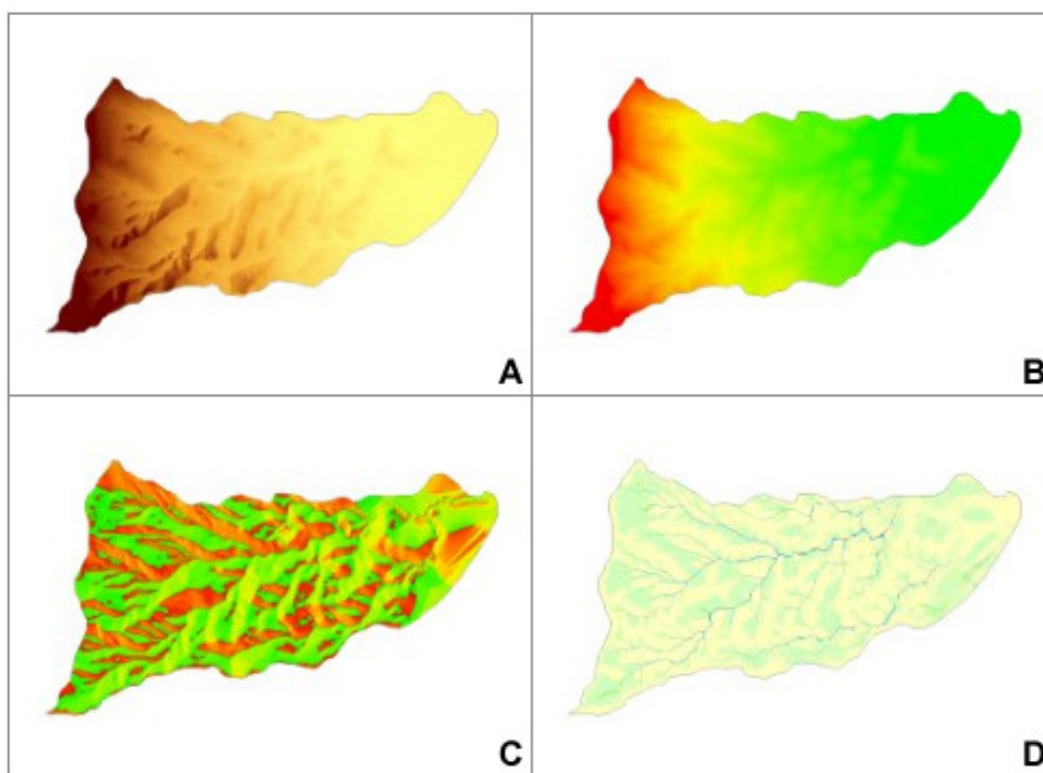
Área	Tipo de Solo	Transmissivida de / Precipitação (T/R)		Coesão Adimensional		Ângulo de Atrito	
		Min	Max	Min	Max	Min	Max
1	Gleissolos	0,000	0,000	0,034	0,042	23,5°	27,5 °
2	Associação de Latosolos + Argissolos	0,162	0,810	0,029	0,035	19,7 °	23,7 °
3	Associação de Cambissolos	0,042	0,210	0,063	0,074	21,2 °	25,2 °
4	Associação de Neossolos + Cambissolos	0,003	0,015	0,215	0,250	21,5 °	25,5 °

A inserção destes parâmetros segue uma área de multi-região, em formato de polígono (*shapefile*), que corresponde ao mapa de solos gerado na PRIMEIRA ETAPA. O método de multi-região foi adotado para identificação das áreas que possuem os mesmos parâmetros geotécnicos de calibração. Os parâmetros da tabela 03 foram reorganizados e são baseados nos valores apresentados nas tabelas 01 e 02 considerando um intervalo de -2 e +2 conforme proposta de uso de

intervalos do software SINMAP para os parâmetros de ângulo de atrito e coesão do solo. Para os campos de entrada de transmissividade / precipitação (T/R Min, Max) adotou-se os volumes precipitados mínimos e máximos de 10mm e 50 mm/hora respectivamente. O valor da condutividade hidráulica para cada classe de solo adotada neste método se baseia nos ensaios de laboratório realizados por Kozciak (2005).

A primeira rotina automatizada é a geração dos temas: (1) Pit preenchimento de correções, (2) Cálculo de vertentes e as direções de fluxo, (3) Cálculo de área de influência específica, representados na FIGURA 10. Estes parâmetros são utilizados pelo modelo para interpretação dos resultados bem como pela extração de parâmetros do *grid* que serão utilizados na próxima etapa.

FIGURA 10 – MAPAS GERADOS DE FORMA AUTOMÁTICA PELO SINMAP



LEGENDA: A – Modelo digital do Terreno (MDT), B – PIT de correções, C – Direção de Fluxo, D – Área de Acumulação de fluxo.

A segunda rotina automatizada deste modelo é a geração do Índice de Estabilidade (SI), descrita abaixo:

Primeiramente o modelo avalia o pior cenário que segue a equação (1-6) descrita abaixo:

$$SI = FS_{\min} = \frac{C_1 + \cos \theta \left[1 - \min \left(x_2 \frac{a}{\sin \theta}, 1 \right) r \right] t_1}{\sin \theta}$$

Onde:

C1 = menor coesão adimensional

X2 = maior transmissividade/precipitação

T1 = menor ângulo de atrito

a e 0 = são variáveis da topografia

r = 0,5 (constante)

As variáveis **a** e **0** são calculadas pelo modelo a partir da inclinação da vertente. A variável **r** considera a relação da densidade essencialmente como constante para permitir a incerteza entre os parâmetros adotados de C, X e T.

As áreas onde o FS é maior que 1, ou seja incondicional estável, é aplicada a equação (1-7) descrita abaixo:

$$FS_{\max} = \frac{C_2 + \cos \theta \left[1 - \min \left(x_1 \frac{a}{\sin \theta}, 1 \right) r \right] t_2}{\sin \theta}$$

Onde:

C2 = maior coesão adimensional

X1 = menor transmissividade/precipitação

T2 = maior ângulo de atrito

a e 0 = são variáveis da topografia

r = 0,5 (constante)

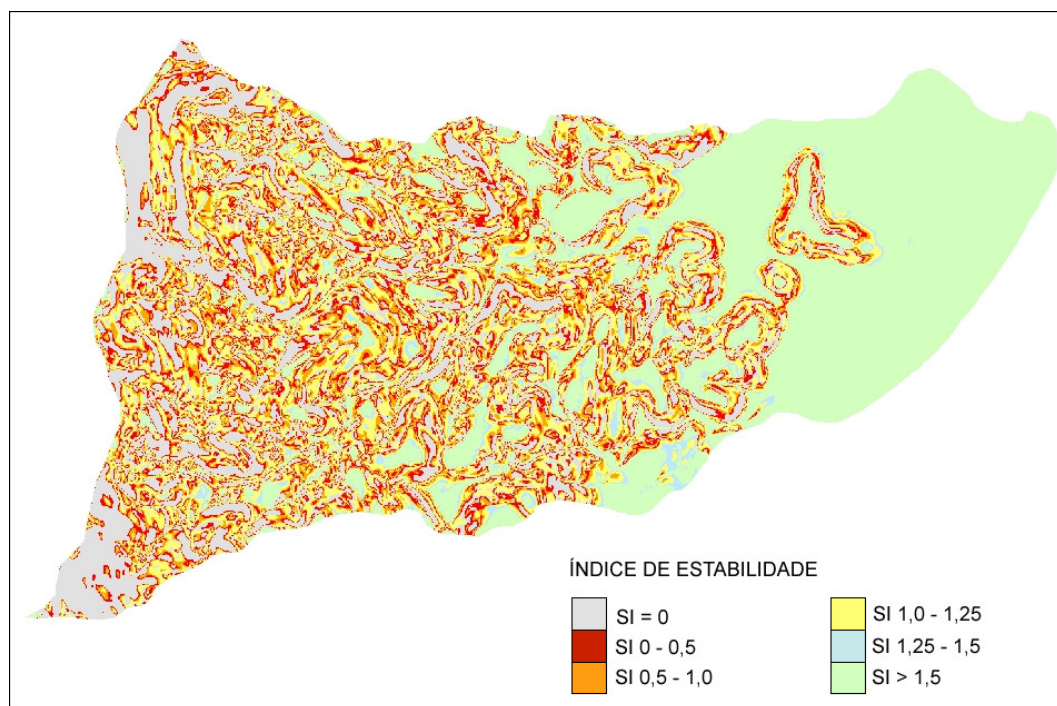
De acordo com Pack (2005) as áreas onde o fator de segurança mínimo é menor que 1, há uma possibilidade (probabilidade) de fracasso. Portanto a probabilidade espacial adotada possui uma incerteza devido à variabilidade espacial

em C , $\tan\theta$ e T . Esta probabilidade também possui um elemento temporal em que R caracteriza uma umidade que pode variar com o tempo. Portanto, a incerteza em X combina probabilidades espaciais e temporais.

Para este método os valores dos parâmetros de coesão e ângulo de atrito foram estipulados considerando a entrada de índices máximos e mínimos com base nos valores adotados para o método (1). Para a coesão adimensional usada na equação (01-1) foi considerado a mesma resistência das raízes que foi adotada para o método (1).

Como resultado desta rotina tem-se o mapa apresentado na FIGURA 11. Os dados utilizados de T/R indicaram que a bacia estava toda saturada.

FIGURA 11 – MAPA DE ÍNDICE DE ESTABILIDADE PRELIMINAR GERADO PELO SINMAP



O mapa apresentado na FIGURA 11 é gerado automaticamente pelo SINMAP. Para esta figura foi mantida as configurações originais propostos como referência do resultado apresentado pelo modelo SINMAP. A tabela 05 apresenta a discretização do mapa com seu respectivo nível de acerto em relação aos escorregamentos.

TABELA 04 – ÍNDICE DE ESTABILIDADE PRELIMINAR DO MÉTODO (2)

Classes	Condição do (FS)	Área da bacia (m²)	% bacia	Área Deslizamentos (m²)	% Acertos
6	0	3.620.125	21,92%	358.275	43,43%
5	0 – 5	1.836.350	11,12%	120.175	14,57%
4	0,5 - 1	2.056.350	12,45%	129.825	15,74%
3	1 – 1,25	3.312.175	20,06%	185.600	22,50%
2	1,25 – 1,5	833.875	5,05%	22.125	2,68%
1	FS > 1,5	4.627.375	29,39%	8.900	1,08%

Estabelecer limites entre as classes de Índice de Estabilidade é extremamente subjetivo, cabendo ao autor avaliar quais as classes devem ser utilizadas. Como os dois métodos têm como pressupostos a teoria equilíbrio-limite, adotou-se o valor de (FS<1) como sendo a classe mais Instável para os dois mapas.

Como a proposta de classificação do SINMAP apresenta seis índices de estabilidade (SI) estas classes foram reorganizadas em cinco classes para uma melhor comparação entre os dois métodos adotados.

Neste sentido, para execução da análise e comparação dos dois métodos, o mapa do SINMAP (FIGURA 11), que pertence ao método (2), foi reclassificado conforme o índice de estabilidade (SI) proposto no QUADRO 03. Desta forma, obteve-se um novo mapa de índice de estabilidade para este método.

4.2.4. QUARTA ETAPA

Esta etapa consistiu em realizar o cruzamento entre os dois mapas de Índice de Estabilidade (SI) entre si, a fim de quantificar e analisar as diferenças entre os dois métodos apresentados.

O segundo procedimento desta etapa foi a sobreposição e cruzamento dos *grids* do Inventário de Cicatrizes de Escorregamentos com os dois mapas de Índice Estabilidade (SI) elaborados nas ETAPAS 2 e 3.

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os dois procedimentos metodológicos admitem instabilidade na porção oeste da bacia do Ribeirão, conforme os Mapas 1 e 2.

Esta área compreende 67% da bacia que apresenta alta dissecação com declividades superiores a 15° que são condicionadas pelas discontinuidades das estruturas geológicas presentes nesta porção mais elevada da área de estudo, como juntas e falhas antigas, que são aproveitadas pela água e pelos lentos processos de denudação associados que assim promovem o desenvolvimento em profundidade das massas de solos e rochas decompostas.

A tabela 05 apresenta a discretização do Mapa 1

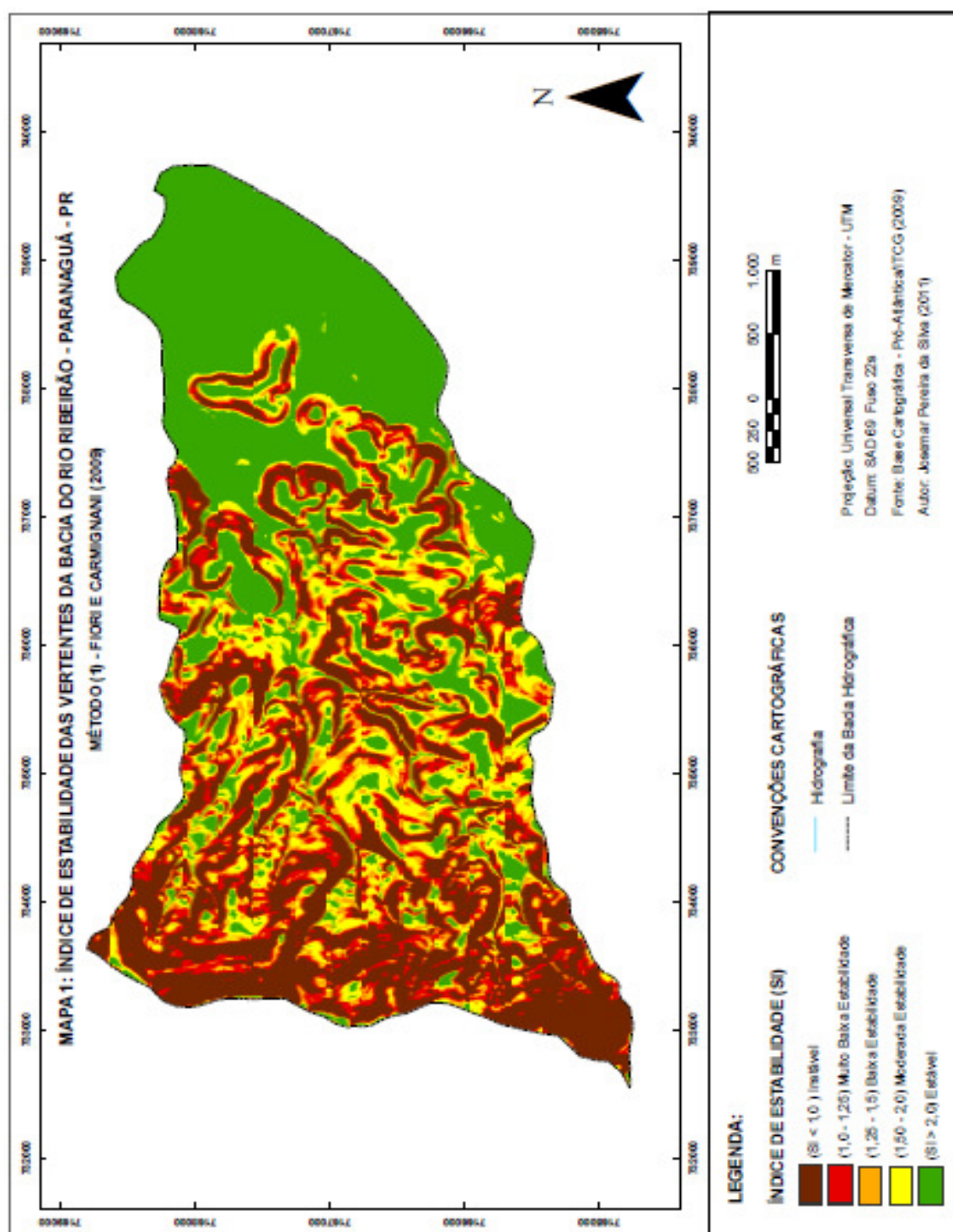
TABELA 05 – ÍNDICE DE ESTABILIDADE (SI) DO MÉTODO (1)

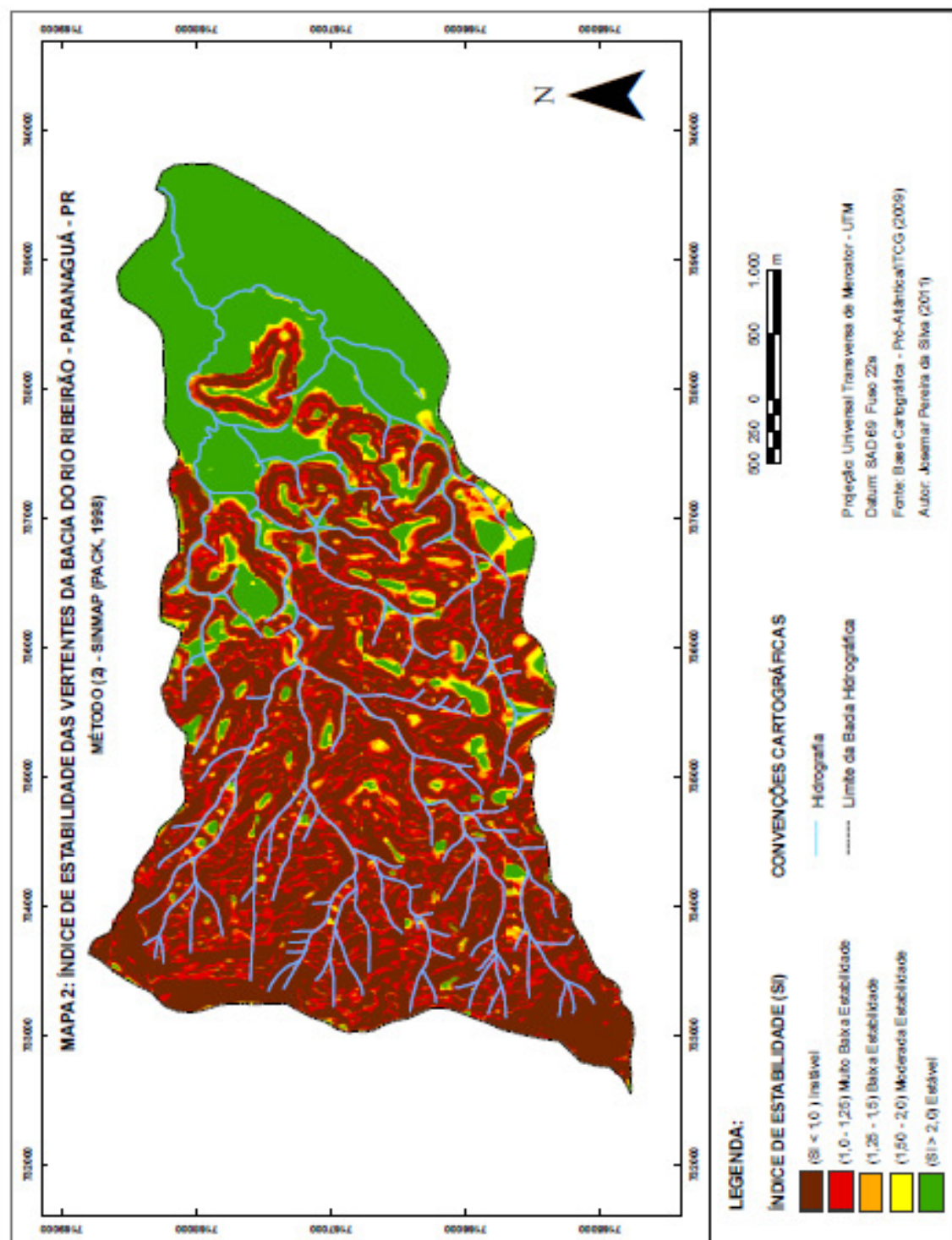
(SI)	(FS)	Área da bacia (m²)	% bacia
Instável	0 – 1	4.583.300	27,76%
Muito Baixa Estabilidade	01 – 1,25	2.290.600	13,87%
Baixa Estabilidade	1,25 – 1,5	1.561.475	9,46%
Moderada Estabilidade	1,5 – 2,0	2.316.600	14,03%
Estável	FS > 2,0	5.759.450	34,88%

A tabela 06 apresenta a discretização do Mapa 2

TABELA 06 – ÍNDICE DE ESTABILIDADE DO MÉTODO (2)

(SI)	(FS)	Área da bacia (m²)	% bacia
Instável	0 – 1	7.512.825	45,50%
Muito Baixa Estabilidade	01 – 1,25	3.312.175	20,06%
Baixa Estabilidade	1,25 – 1,5	833.875	5,05%
Moderada Estabilidade	1,5 – 2,0	684.700	4,15%
Estável	FS > 2,0	4.167.850	25,24%





A precisão dos resultados apresentados, ou seja, os mapeamentos das áreas de maior instabilidade são intimamente dependentes da qualidade e da resolução espacial do (MDT) e das áreas de calibração adotadas.

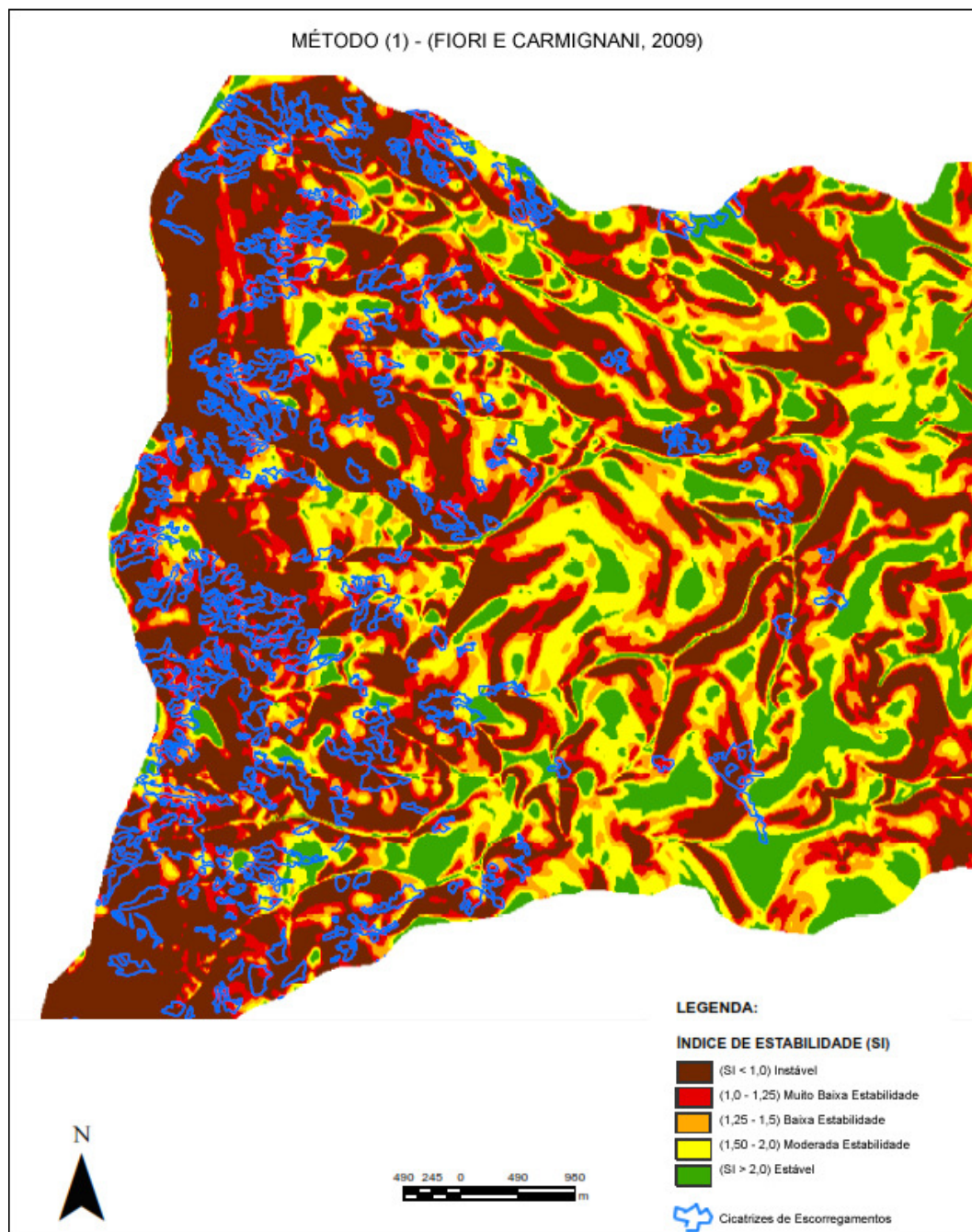
A tabela 07 apresenta uma síntese dos resultados entre cruzamento dos escorregamentos e classes do índice de estabilidade dos dois métodos. A maioria das cicatrizes inventariadas incidu sobre as classes mais instáveis para os dois procedimentos metodológicos, o que corresponde naturalmente aos ambientes mais susceptíveis aos processos de escorregamentos.

TABELA 07 – COMPARAÇÃO ENTRE OS DOIS MÉTODOS

(SI)	(FS)	MÉTODO (1)		MÉTODO (2)	
		% área da bacia	% Acertos	% área da bacia	% Acertos
Instável	0 – 1	27,76%	62,81%	45,50%	73,74%
Muito Baixa Estabilidade	01 – 1,25	13,87%	19,52%	20,06%	22,50%
Baixa Estabilidade	1,25 – 1,5	9,46%	8,19%	5,05%	2,68%
Moderado	1,5 – 2,0	14,03%	6,94%	4,15%	0,54%
Estável	FS > 2,0	34,88%	2,55%	25,24%	0,54%

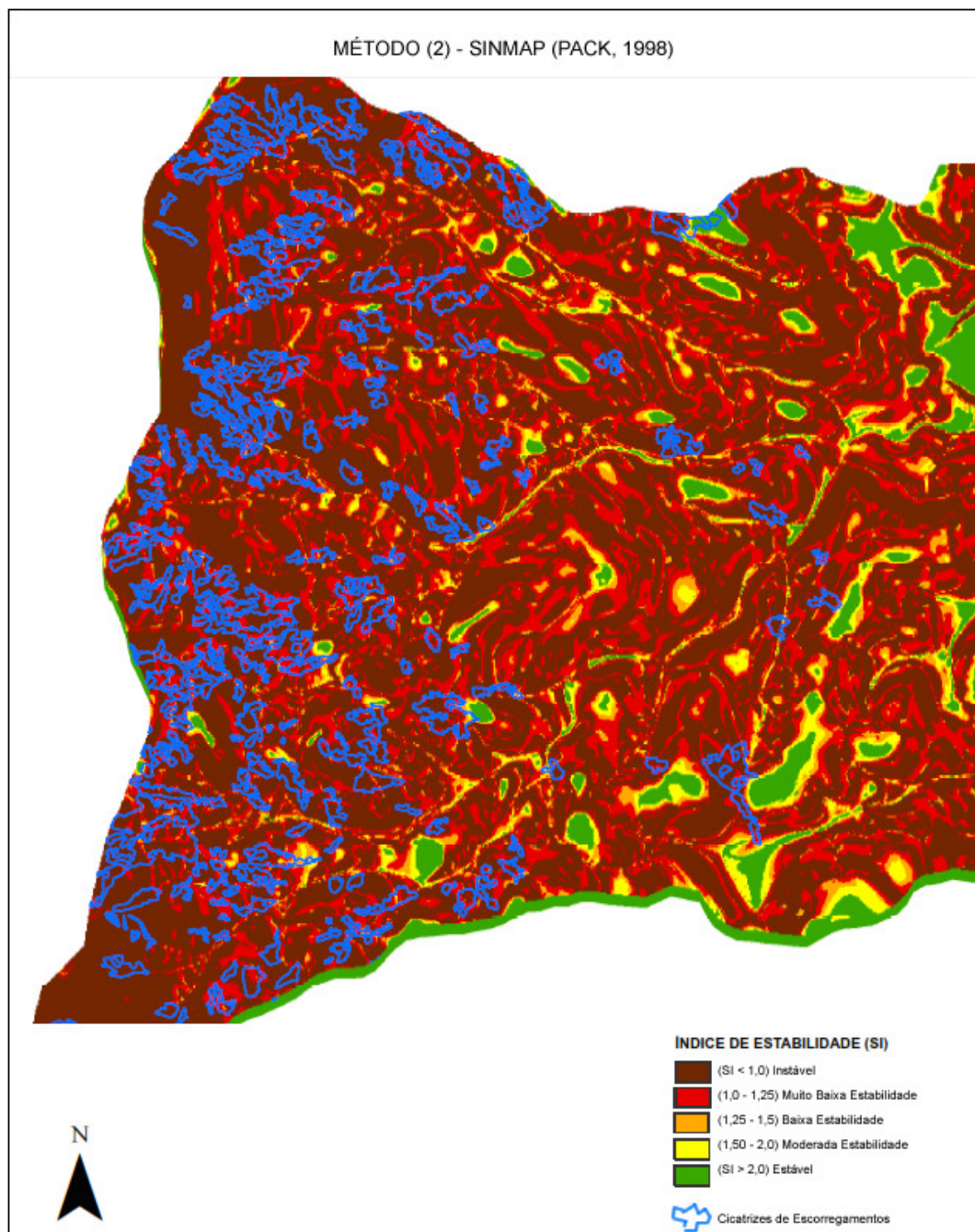
A figura 12 apresenta a sobreposição do inventário de escorregamentos com o mapa de Índice de Estabilidade (SI), conforme o procedimento metodológico (1)

FIGURA 12 – DETALHE DOS ESCORREGAMENTOS SOBRE O MAPA DE ÍNDICE DE ESTABILIDADE DO MÉTODO (1)



A figura 13 apresenta a sobreposição do inventário de escorregamentos com o mapa de Índice de Estabilidade (SI), conforme o procedimento metodológico (2)

FIGURA 13 – DETALHE DOS ESCORREGAMENTOS SOBRE O MAPA DE ÍNDICE DE ESTABILIDADE DO MÉTODO (2)

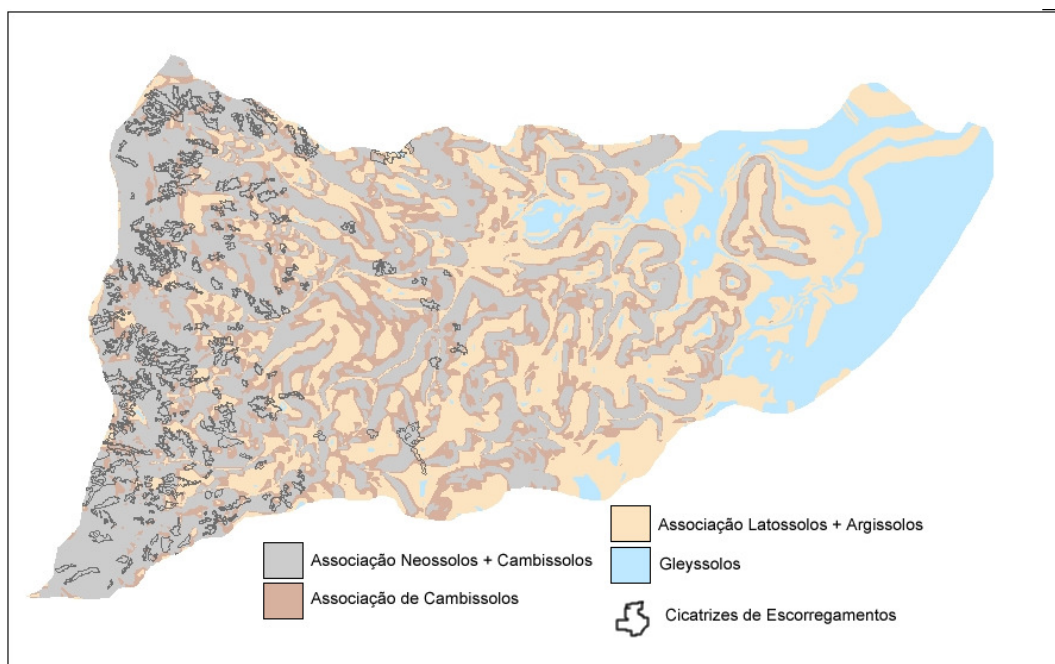


As declividades superiores a 22° com associação de Neossolos Litólicos + Cambissolos são definidas como áreas com fator de segurança instável ($FS < 1$) pelo método (1).

O método (2) considera áreas instáveis a partir das declividades de 12° . Os solos para essa classe compreendem parte da associação de Cambissolos, sendo que a maioria é constituída pela associação de Neossolos Litólicos + Cambissolos. Conforme o método (2) os escorregamentos estão concentrados nas áreas onde a área de contribuição é maior, ou seja, com o aumento da umidade do solo, se tem o aumento do efeito de poros-pressão.

No geral, os escorregamentos estão situados em declividades superiores a 14° , acima de 400 metros de altitude sobre forte presença da associação de Neossolos Litólicos + Cambissolos e uma pequena parcela dos tipos de associação de Cambissolos, conforme mostra a FIGURA 14. Cerca de 79,23% dos escorregamentos estão concentrados nas declividades de 16° a 35° .

FIGURA 14 – MAPA DE SOLOS E A OCORRÊNCIA DOS ESCORREGAMENTOS



O método (1) demarcou 27,76% da área como Instável, resultando em um acerto de 62,81% dos escorregamentos identificados na FIGURA 12. Desta classificação, 83% coincidem com a classificação do SINMAP. O método (2) demarcou 45,50% da área como Instável (FIGURA 13), tendo um total de acerto 73,74% para essa classe.

As duas técnicas consideraram principalmente a associação de solos Neossolos Litólicos+Cambissolos como áreas Instáveis cujas declividades são superiores a 21°, o que é coerente com os principais escorregamentos.

No método (1) as áreas consideradas como Muito Baixa Estabilidade representam 13,87%. Sua distribuição espacial é por toda a bacia e tem a ocorrência de 19,52% dos escorregamentos. Estes escorregamentos podem ser justificados pela localização adjacente desta classe nas bordas das áreas Instáveis. A declividade varia de 16° a 23° com a combinação das associações de Cambissolos e Neossolos+Cambissolos.

Para a classe Muito Baixa Estabilidade, 53,74% das áreas da metodologia do SINMAP são idênticas espacialmente ao método (1). O SINMAP considerou 20,06% da bacia com Muito Baixa Estabilidade. Cerca de 22,50% dos escorregamentos ocorreram nesta classe, cujas tipologias dos solos alternam entre as associações de Latossolos+Argissolos, Cambissolos e Neossolos+Cambissolos. As declividades variaram entre 9° até 26°. Conforme pode ser observado nos Mapas 1 e 2 a distribuição espacial da classe de Muito Baixa Estabilidade (1 - 1,25) do SINMAP é superior a área de distribuição da mesma classe adotada pelo método (1).

O método (1) considerou as áreas com baixa estabilidade com declividades entre 15° a 18° com predominância da associação de Cambissolos.

As áreas definidas como de Baixa Estabilidade correspondem a 9,46%, sendo que 8,19% dos escorregamentos ocorreram nestas áreas. Esta classe possui 84,70% de relação com a classe Instável do método (2). Estas duas classificações compreendem as declividades de 16° a 18°. As diferenças apresentadas para mesma classe ocorreram pelo uso de parâmetros mínimos adotados para modelagem do SINMAP que possivelmente potencializaram a ocorrência maiores instabilidades no método (2). Desta forma, existe apenas 1,82% de relação com a mesma classe, ou seja, Baixa Estabilidade gerada pelo método (2).

O SINMAP adotou a classe de Baixa Estabilidade para as declividades entre 5° a 16° com associação dos solos Latossolos+Argissolos e associação de Cambissolos. Analisando os temas gerados a ocorrência de 2,68% dos escorregamentos podem estar relacionados a extravasamentos iniciados nas classes mais instáveis.

O método (1) delimitou as áreas de Moderada Estabilidade (1,5-2,0) principalmente com associação de Latossolos+Argissolos e algumas áreas com

associação de Cambissolos. Os perfis para essa classe são planares e côncavos que variam entre as declividades de 9° a 15°.

O método (2) considerou que as áreas de Moderada Estabilidade estão compreendidas entre as declividades de 6° até 17° com predomínio da associação de Latossolos+Argissolos. O que chama atenção para essa classe é que as duas técnicas empregadas também não coincidem espacialmente, aonde cerca de 1,99% da área mapeada pelo SINMAP é a mesma que o método (1). A maior parte das áreas moderadas da classificação gerada pelo SINMAP localiza-se no lado leste da bacia, enquanto o método (1) distribui as áreas moderadas por toda a bacia.

Os valores mínimos de coesão e ângulo de atrito mantiveram os valores das áreas de calibração do método (2) mais instáveis que os aplicados no método (1). De acordo com o modelo, os parâmetros mínimos de coesão e ângulo de atrito juntamente com T/R máxima propiciam os piores índices de estabilidade.

O SINMAP considerou que as áreas de Moderada Estabilidade são aonde ocorrem os perfis retilíneos com planos convexos nas porções mais elevadas da bacia. Nas áreas planas e de menor gradiente altimétrico as classificou com Estáveis.

De modo geral, os fundos de vales são classificados como de Moderada Estabilidade nos dois métodos, com maior percentagem no método (1).

O método (1) considerou as áreas com até 14° de declividade como estáveis e o método (2) considerou até 12°. Isso pode ser visualizado facilmente no mapa pela diferença do tamanho das classes e sua distribuição na bacia. Mesmo assim, os dois procedimentos metodológicos apresentam uma grande proximidade na classificação para esse índice de estabilidade, aonde cerca de 78% do SINMAP é igual ao método (1). Em ambos os métodos existe a predominância estável para a classificação dos solos Gleyssolos que ocorrem nas áreas mais aplainadas e com associação de Latossolos+Argissolos onde as declividades são superiores a 5°, ou seja, com áreas suaves onduladas.

Para o inventário de escorregamentos utilizado não há registro de cicatrizes acima da cota 1060. Isso porque nas altas cotas altimétricas da área de estudo é formada por granitos que possuem maior resistência ao intemperismo químico. Além disso, apresentam vertentes bastante íngremes o que dificulta a formação de solos. Desta forma, nota-se boa correlação entre a inclinação da vertente com os índices mais instáveis indicados pelos dois métodos.

Os parâmetros mínimos somados aos algoritmos de probabilidade que são embutidos no método (2) condicionaram áreas mais instáveis para toda a bacia. O método (1) se apresentou mais conservador por utilizar parâmetros geotécnicos fixos ao qual tinham maior resistência ao cisalhamento do que os valores mínimos empregados pelo método (2). Além disso, o método (1) não possui nenhuma condição probabilística na sua equação.

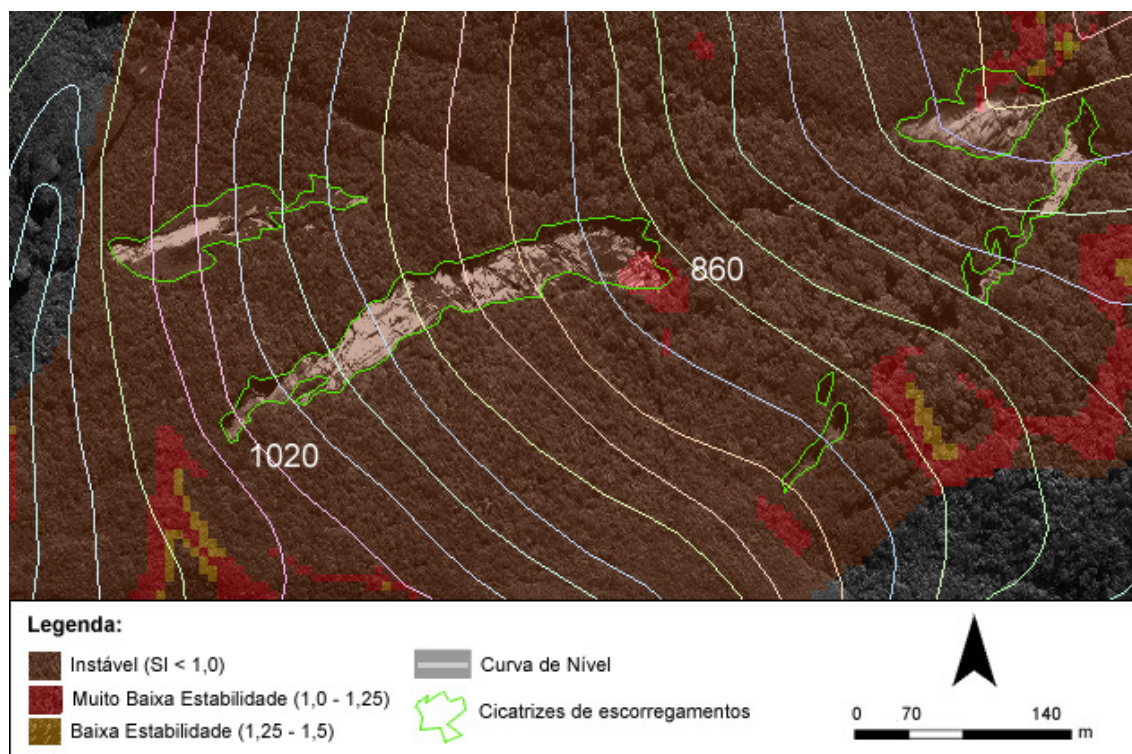
Abaixo da cota 160 não há registro de cicatrizes de escorregamentos cuja topografia para esta altitude ainda tem características suaves e pouco onduladas com baixas declividades.

Apesar disso, as elevações entre as cotas 40 e 80 na porção leste da bacia foram classificadas como Instáveis pelos dois métodos. Isso se deve a presença de morrotes nesta região da bacia que apresentam bruscas diferenças de inclinação e que somadas às áreas de calibração adotadas para os dois métodos acabam determinando as instabilidades destas vertentes.

O inventário dos escorregamentos em forma poligonal, que em ambiente SIG foi convertido em *grid*, permitiu uma melhor análise dos resultados com a comparação pixel à pixel entre os dois mapas de índice de estabilidade e as cicatrizes de escorregamentos.

A FIGURA 15 representa uma visão de detalhe das cicatrizes dos escorregamentos (contorno em verde) sobrepostas ao mapa de Índice de Estabilidade (SI) do Mapa 1. Esta figura também pode representar um erro ocasionado pelo próprio processo de modelagem, bem como pelo depósito de material que sofreu arraste das áreas superiores e que é quantificado como resultado da modelagem das áreas subjacentes.

FIGURA 15 – EXEMPLO DE ESCORREGAMENTO



Autor: Josemar (2011)

O emprego do inventário dos escorregamentos se mostrou peça chave para calibração dos dois modelos quando utilizado em forma de *grids* ao invés de pontos ou círculos. As técnicas de sensoriamento remoto auxiliaram na identificação dos escorregamentos. Porém, devesse alertar que esse procedimento exige do operador domínio e acurácia para a delimitação dos movimentos de massa.

Nesta perspectiva, é possível observar que as delimitações das cicatrizes de escorregamentos podem interferir nos resultados finais, uma vez que no momento da ruptura do solo parte do material pode ser transportado das áreas mais críticas e ser depositado nas áreas inferiores ou que apresentam mais estabilidade, conforme a FIGURA 15.

Desta maneira, pode-se afirmar que o nível de acerto da calibração dos mapas de índice de estabilidade (SI) com sobreposição do inventário das cicatrizes de escorregamentos é mais eficaz quando se tem um posicionamento preciso das zonas de deflagração dos escorregamentos.

Assim sendo, a dificuldade principal está na delimitação das áreas onde ocorreram às rupturas separadas das áreas de depósitos. A identificação destas

áreas pode aumentar ainda mais o nível de acerto dos dois métodos aplicados. Para os mapeamentos também deve ser considerado um certo erro da interpretação da modelagem ocasionado pelos dados cartográficos disponíveis.

Os resultados mostram que o método (2) designou áreas instáveis, ou seja, com instabilidade ($SI = 0$) principalmente em áreas com maior declividade. Portanto, constata-se que para o modelo a declividade da vertente tem maior representatividade na caracterização da classe de estabilidade para cada pixel.

Para avaliar a confiabilidade dos métodos aplicados optou-se um utilizar uma matriz de erros/confusão para identificar o nível de erro de cada mapa de Índice de Estabilidade (SI) demonstrado na tabela 08.

TABELA 08 – MATRIZ DE ERRO/CONFUSÃO

(SI)	(FS)	MÉTODO (1)		MÉTODO (2)	
		% área da bacia	% da área do (SI) que não escorregou	% área da bacia	% da área do (SI) que não escorregou
Instável	0 – 1	27,76%	88,70%	45,50%	91,90%
Muito Baixa Estabilidade	01 – 1,25	13,87%	92,97%	20,06%	94,40%
Baixa Estabilidade	1,25 – 1,5	9,46%	95,67%	5,05%	97,35%

Com base nos valores apresentados na tabela 07, o total de acerto sobre o universo de escorregamentos nas áreas mais instáveis do método (2) obteve um melhor nível de acerto do que o apresentado pelo método (1). Entretanto, se analisarmos a tabela 08 é possível observar que este método errou mais para indicar os locais passíveis de escorregamentos, ou seja, estimou mais áreas susceptíveis a escorregamentos que não foram deflagrados.

A partir das simulações realizadas em ambiente SIG foi possível averiguar que os valores T / R (transmissividade/precipitação) pouco influenciaram nos resultados do método (2). Apesar disso, pelas características geomorfológicas/climáticas da área de estudo, fica evidenciado que esta possui alta susceptibilidade a movimentos de massa quando submetida a determinados volumes precipitados.

A grande vantagem do método (2), ou seja, do SINMAP é que ele admite a introdução de valores não precisos no modelo, dessa maneira, os cálculos podem ser executados considerando os piores e melhores cenários simultaneamente, permitindo uma avaliação preliminar de áreas que na maioria dos casos não possuem dados consistentes para interpretação.

Para os dois métodos a geomorfologia da vertente demonstrou ser o atributo de maior representatividade considerando os valores geotécnicos adotados para as quatro áreas de calibração.

6. CONCLUSÕES

Os resultados dos métodos empregados apresentam valores de muita instabilidade nas áreas de maior declividade, cerca de 27,76% para o método (1) e 45,50% para o método (2), com níveis de acerto identificados pela adoção do inventário de escorregamentos sendo respectivamente de 62,81% e 73,74%. Não foi possível correlacionar todas as classes de índice de estabilidade, pois estas se apresentaram com distribuição espacial diversificada entre as mesmas classes.

Os índices de estabilidade apresentados não devem ser interpretados como numericamente precisos, sendo mais apropriado se interpretados em termos de risco relativo.

Como a base cartográfica e as áreas de calibração adotadas foram as mesmas para os dois procedimentos metodológicos, pode-se estabelecer que as diferenças dos resultados apresentados pelos dois mapas de índice de estabilidade estão relacionados às seguintes afirmações:

A primeira questão é o emprego de duas equações do fator de segurança (FS) diferentes para cada procedimento metodológico. A equação do método (2) admite a combinação do modelo do talude infinito com o índice topográfico que pode variar dependendo dos dados de precipitação de entrada no sistema.

A segunda questão é que o método (1) considera valores únicos e fixos para as propriedades físicas do solo. Já com o método (2) é possível estabelecer valores máximos e mínimos para a mesma área de calibração. Deste modo, com base em critérios probabilísticos e características do terreno, o SINMAP representa a área a ser mapeada considerando a incerteza dos valores adotados.

A precisão dos resultados aplicados está intimamente relacionada com a qualidade dos dados e recursos empregados, sejam eles cartográficos ou propriedades geotécnicas dos solos. A vantagem do uso do SINMAP é que além da sua facilidade de manuseio, possibilita também a inserção de diferentes intervalos de parâmetros, resultando assim nas mais variadas simulações. O método (1) é mais trabalhoso por não se tratar de um modelo customizado. A determinação de valores fixos para os parâmetros adotados pelo método (1) também devem ser considerados como incertos, pois se limitam as mudanças bruscas determinadas pelas áreas de calibração.

Os resultados mostram que os modelos não são perfeitos, mas podem apontar caminhos para a investigação e compreensão dos processos naturais. Ainda assim, os dois procedimentos metodológicos empregados neste trabalho exigem do operador entendimento tanto da dinâmica natural do ambiente como domínio de técnicas de geoprocessamento. Desta forma, a sobreposição e o cruzamento entre os diversos temas trabalhados em ambiente SIG possibilitaram uma melhor interpretação dos resultados.

Para as áreas de calibração se faz necessário as medições adequadas da condutividade hidráulica (permeabilidade), densidade do solo, ângulo de atrito e coesão do solo que podem demonstrar melhores resultados nos mapas. Em contra partida existe a necessidade de uma escala de trabalho de maior detalhe.

Nenhuma das metodologias aplicadas leva em conta a umidade antecedente ou o efeito que a estrutura geológica pode ter na concentração do fluxo de água subterrânea. No entanto, ambos os fatores tem um efeito significativo sobre a instabilidade das vertentes.

O emprego de modelos matemáticos, fundamentados em fenômenos físicos, permite que sejam calculadas as variabilidades espaciais dos valores de fator de segurança para grandes áreas. Nesta perspectiva, as duas metodologias possibilitam que diversas simulações sejam efetuadas com base em equações que procuram representar as condições de instabilidade geotécnica.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AB' SÁBER, A. **Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas**. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003

ALMEIDA, F.F.M. e CARNEIRO, C.D.R - 1998 - **Origem e evolução da Serra do Mar**. Revista Brasileira de Geociências, São Paulo, v.28, n.2, p. 135-150

AUGUSTO FILHO, O.; VIRGILI, J.C. **Estabilidade de Taludes**. In. Oliveira, A.M.S.; Brito, S.N.A. (Eds.). Geologia de Engenharia. São Paulo: ABGE, 1998. Cap. 15, p. 243 – 269.

BORCHARDT, N. **Diagnóstico Geológico-Geotécnico na Estabilidade das Vertentes do Alto e Médio Curso da Bacia do Rio Sagrado – PR**. Dissertação (Mestrado em Geologia Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

CAPUTO, H.P. (1988) **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 6 ed. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científico, v.2. CHRISTOFOLETI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. Ed. Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 1999.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 2. Ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006.

FENDRICH, R. e FERREIRA, M. A. (1995). **Rosa de Frequência dos Ventos no Estado do Paraná**. Revista Acadêmica da PUC/PR. Vol. 11, p. 49 – 57.

FERNANDES, N.F. (1996). **Modelagem matemática em geomorfologia: potencialidades e limitações**. Revista Sociedade e Natureza, 8(15):222-227.

FERNANDES, N. F.; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T.; VIEIRA, B. C.; MONTGOMERY, D. R.; GREENBERG, H. (2001) Condicionantes geomorfológicos dos escorregamentos nas encostas: avaliação de metodologias e aplicação de modelo de previsão de áreas susceptíveis. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 2, n. 1, p. 51-71.

FIORI, A. P. (1995) Fatores que influenciam na análise e no movimento de massa em encostas – **Boletim Paranaense de Geociências**, n.43, p.7-24 Ed. Da UFPR.

FIORI, A. P.; CARMIGNANI, L. (2009) **Fundamentos de Mecânica dos solos e das rochas: aplicação na estabilidade de taludes** – Ed. UFPR – Curitiba, PR.

FLORENZANO, T. G. (Orgs). **Geomorfologia: Conceitos e Tecnologias Atuais**. São Paulo: Oficina de Texto, 2008. Cap. 6, p. 159-184.

GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (Orgs.). **Geomorfologia e Meio Ambiente**. Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, 2007.

IAPAR. **Cartas Climáticas do Paraná**. Disponível em:
http://200.201.27.14/Sma/Cartas_Climáticas/Cartas_Climaticas.htm. Acessado em
 09/08/2011.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapa de Vegetação do Brasil (1:5.000.000)**. 2004.

KOBIYAMA, M.; MENDONÇA, M.; MORENO, D.A.; MARCELINO, I.P.V.O.; MARCELINO, E.V.; GONÇALVES, E.F.; BRAZETTI, L.L.P. **Prevenção de Desastres Naturais: Conceitos Básicos**. Curitiba: Ed. Organic Trading. 109p.

KOZCIAK, S. **Análise Determinística da Estabilidade de Vertentes na Bacia do Rio Marumbi – Serra do Mar – Paraná**. Curitiba, 2005, p. 151. Tese (Doutorado em Geologia Ambiental). Universidade Federal do Paraná.

MAACK, R. **Geografia física do Estado do Paraná**. 3°. edição. Curitiba: Imprensa Oficial, 2002.

MINEROPAR – Minerais do Paraná S/A. **Folha Geológica de Curitiba (1:250.000)**. Paraná, 2005.
 Disponível em <<http://www.mineropar.gov.pr.br>>. Acesso em 30/08/2011.

NBR 11.682 (1991) **Estabilidade de Taludes**. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 39 p.

OKA-FIORI; SANTOS, L.J.C.; CANALI, N. E.; FIORI, A.P.; SILVEIRA, C.T.; SILVA, J.M.F.; ROSS, J.L.S., 2006 - **Atlas Geomorfológico do Estado do Paraná**: escala base 1:250.000, modelos reduzidos 1:500.000. Minerais do Paraná – MINEROPAR, Curitiba, 59 pp.

PACK, R. T., D. G. TARBOTON AND C. N. GOODWIN, "**The SINMAP Approach to Terrain Stability Mapping**," Paper Submitted to 8th Congress of the International Association of Engineering Geology, Vancouver, British Columbia, Canada 21-25 September 1998.

PACK, R. T., TARBOTON D. G., GOODWIN C. N., PRASAD, A. "**SINMAP user's manual**", 2005.

PAULA, E. V. "**Análise do Processo de Produção de Sedimentos na Área de Drenagem da Baía de Antonina: Uma Abordagem Geopedológica**". Tese (Doutorado em Geografia) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

RODRIGUES, B.B. **Proposta de sistemática para tomada de decisão relativa a movimentos de massa gravitacionais: Aplicação em Ouro Preto (MG) – Tese de Doutorado** – Escola Estadual paulista – Instituto de geociencias e Ciências exatas – Campus de Rio Claro-SP, 2002.

SEMA - Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. **Mapeamento da Floresta Atlântica do Estado do Paraná**. Programa Floresta Atlântica. Relatório final. Curitiba, 2002.

SILVEIRA, C. T. **“Análise Digital do Relevo na predição de unidades preliminares de mapeamento de solos: integração de atributos topográficos em sistemas de informações geográficas e redes neurais artificiais”**. Tese (Doutorado em Geografia) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

SIMEPAR – **SISTEMA METEOROLÓGICO DO PARANÁ**.

Disponível em: <http://www.simepar.br>

Acessado em: Abril de 2011

TABALIPA, N. L. **“Estudo da estabilidade de vertentes da bacia do Rio Ligeiro, Pato Branco, Paraná”**. Tese (Doutorado em Geologia) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

TOMINAGA, L. K. (Org.); SANTORO, J. (Org.); AMARAL, R. (Org.) . **Desastres Naturais: conhecer para prevenir**. 1ª. ed. São Paulo: Instituto Geológico, 2009. v. 01. 196 p.

VARNES, D.J. **Landslide hazard zonation: a review of principles and practice**. UNESCO, Paris, 1984.

WOLLE, C. M. e PEDROSA, J. A. B. (1981). **Horizontes de Transição Condicionam Mecanismo de Instabilidade de Encostas na Serra do Mar**. Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, ABGE, vol. 2, p. 121 – 135. Itapema – SC.