

MAPEAMENTO DA SUSCEPTIBILIDADE A DESLIZAMENTOS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO CAETÉ, ALFREDO WAGNER/SC

Prof. Dr. Leandro Redin Vestena

Programa de Pós-Graduação em Geografia, UNICENTRO

Rua Simão Varela de Sá, nº. 03 – CEP 85040-080, Guarapuava (PR) – Brasil

Tel: (55 42) 3629-8117 - lvestena@unicentro.br

RESUMO

O presente artigo teve por objetivo identificar e mapear a susceptibilidade a deslizamentos na bacia hidrográfica de Caeté, município de Alfredo Wagner/SC, região serrana de Santa Catarina. O modelo SINMAP (Stability Index Mapping) foi utilizado para determinar o índice de estabilidade das vertentes, a partir da combinação de um modelo hidrológico com um de estabilidade de encostas. Os resultados obtidos demonstram a presença de áreas com elevado grau de instabilidade das encostas e com grau de estabilidade intermediária, que podem ser facilmente desestabilizadas por atividades humanas, principalmente pela retirada da cobertura vegetal. O conhecimento prévio das áreas suscetíveis a deslizamentos e escorregamentos subsidia ações preventivas e mitigadoras.

Palavras-chave: SINMAP, deslizamento, áreas de risco.

ABSTRACT

This article aims to identify and map susceptibility the landslides in the catchment area of Caeté, in Alfredo Wagner / SC, the mountain region of Santa Catarina. The model SINMAP (Stability Index Mapping) was used to determine the index of stability of the slopes, from the combination of a hydrologic model with another of stability of slopes. The results demonstrate the presence of areas with a high degree of instability of slopes and intermediate degree of stability, which can be easily destabilized by human activities, mainly by removing the vegetal cover. Previous knowledge of the susceptible areas for landslides and sliding subsidize preventive and mitigation.

Key words: SINMAP, landslide, areas at risk.

RESUMEN

Este artículo tiene como objetivo identificar y mapear la susceptibilidad de deslizamientos de tierra en la cuenca hidrográfica del municipio de Caeté Alfredo Wagner/SC, región montañosa del Estado de Santa Catarina. Se utilizó el modelo SINMAP (Stability Index Mapping) para determinar el índice de estabilidad de taludes por medio de la combinación de un modelo hidrológico con un de estabilidad de taludes. Los resultados obtenidos muestran la presencia de zonas con elevado grado de inestabilidad de las laderas y con grado de estabilidad intermedia, que pueden ser fácilmente alteradas por actividades humanas, principalmente por la eliminación de la cobertura vegetal. El conocimiento previo de las zonas susceptibles a deslizamientos y resbalos subvencionan acciones de prevención y mitigación.

Palabras-clave: SINMAP, deslizamiento, zonas de riesgo.

INTRODUÇÃO

Os movimentos de massa são fenômenos naturais, definidos pelo movimento de solo e rocha, que pode ou não ser induzido por atividades humanas. Os prejuízos humanos e econômicos ocasionados por esses movimentos são significativos e estão diretamente associados à crescente ocupação de áreas de risco, ou seja, áreas que se apresentam suscetíveis à sua ocorrência (DAI et al., 2002).

Na natureza os movimentos de massa são variados e envolvem uma grande variedade de materiais, processos e fatores condicionantes (FERNANDES e AMARAL, 1996). Dentre os diversos tipos e classificações de movimentos de massa, utiliza-se o termo deslizamentos, de modo geral, para designar movimentos de massas de solo e/ou rocha, compreendendo rastejos, corridas de massa, escorregamentos e quedas/tombamentos.

De acordo com Guerra (1993), os deslizamentos dependem de fatores, tais como principalmente: inclinação das vertentes, quantidade e frequência das precipitações, presença ou não da vegetação, consolidação de material.

Os deslizamentos estão diretamente associados aos processos de intemperismo e erosão da dinâmica externa da Terra, sob influência da gravidade. Eles são potencializados principalmente

pela ação da água, do vento e do gelo, que interferem no equilíbrio entre as tensões no interior da massa e dependem diretamente da estrutura geológica, da morfologia do terreno, das formas de uso da terra, das propriedades do solo e rochas.

A topografia e a dinâmica dos processos hidrológicos estão entre os fatores mais importantes no controle da instabilidade das vertentes. Nelas os processos de escoamento estão associados às formas de relevo, são diversos e dependem da natureza multivariada dos fenômenos físicos, químicos, biológicos e antrópicos.

No Brasil, de modo geral, pode-se afirmar que a ocorrência dos deslizamentos está quase sempre associada a eventos pluviométricos extremos.

A intervenção humana na bacia hidrográfica do Caeté (BHC), Alfredo Wagner/SC, por meio da agricultura em áreas com grande declividade e o desmatamento de encostas e margens de rios, propicia a redução da infiltração de água no solo e, por conseguinte, o aumento do fluxo superficial, desencadeando fluxo torrencial sob fortes chuvas. Esses fatores acabam favorecendo a instalação de processos de erosão do solo, que desestabilizam encostas e favorecem a ocorrência de deslizamentos (CHECCHIA et al., 2004; CHECCHIA et al., 2006).

A identificação do índice de estabilidade das vertentes da bacia hidrográfica possibilitará prever as áreas suscetíveis a ocorrências de deslizamentos, por meio do mapeamento das áreas de perigo, considerando que o conhecimento prévio das áreas mais suscetíveis à ocorrência de deslizamentos permite que ações mitigadoras preventivas sejam implementadas antes mesmo de sua ocorrência, reduzindo-se, assim, os prejuízos materiais e humanos.

A importância do mapeamento das áreas suscetíveis a deslizamentos é essencial para o planejamento ambiental e manejo adequado do uso e ocupação da terra (GUZZETTI et al., 1999; DAI et al., 2002; COROMINAS et al., 2003; REMONDO et al., 2003; SANTACANA et al., 2003).

Os modelos possibilitam precisamente o processo de uso da experiência anterior como base para a previsão e compreensão do sistema ambiental. Apesar de todos os modelos necessitarem de alguma forma de ajuste nos parâmetros, mesmo medidos no campo, a modelagem torna-se uma ferramenta fundamental e de extrema importância no mapeamento das áreas suscetíveis a deslizamentos. Ela permite a integração e a predição de impactos diante de possíveis ações no ambiente em Sistemas de Informação Geográfica (SIG).

O objetivo do presente estudo é mapear as áreas de risco à ocorrência de deslizamentos, a partir da determinação do grau de estabilidade das encostas.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

A bacia hidrográfica do Caeté, com aproximadamente 164 km² de área, localiza-se no município de Alfredo Wagner, região serrana do Estado de Santa Catarina, entre as latitudes 27° 52' 43" S e 27° 41' 49" S e longitudes 49° 20' 45" W e 49° 11' 17" W (Figura 1).

O Rio Caeté é formado pelos rios Perito e Santo Anjo, com nascentes em altitudes de 1140 e 1600 metros, respectivamente. As densidades de rios e de drenagem revelaram que a bacia apresenta em média 1,54 rios/km² e 1,949 km/km², respectivamente, o que caracteriza uma área bem drenada. As altas densidades são consequência do relevo da região, caracterizado por ser acidentado, com elevadas declividades, o que caracteriza os cursos fluviais com um grande número de corredeiras, saltos e cachoeiras, assim como o elevado número de nascentes (VESTENA *et al.*, 2006).

O relevo é acidentado com encostas íngremes e atividades de uso inadequadas do solo na bacia tornam mais suscetíveis as ocorrências dos processos erosivos.

O clima na bacia do Rio Caeté está sob o domínio da zona extratropical, que resulta em temperaturas com caráter mesotérmico – temperaturas anuais médias entre 16°C e 20°C, inverno frio e verão amenizado pelas altitudes.

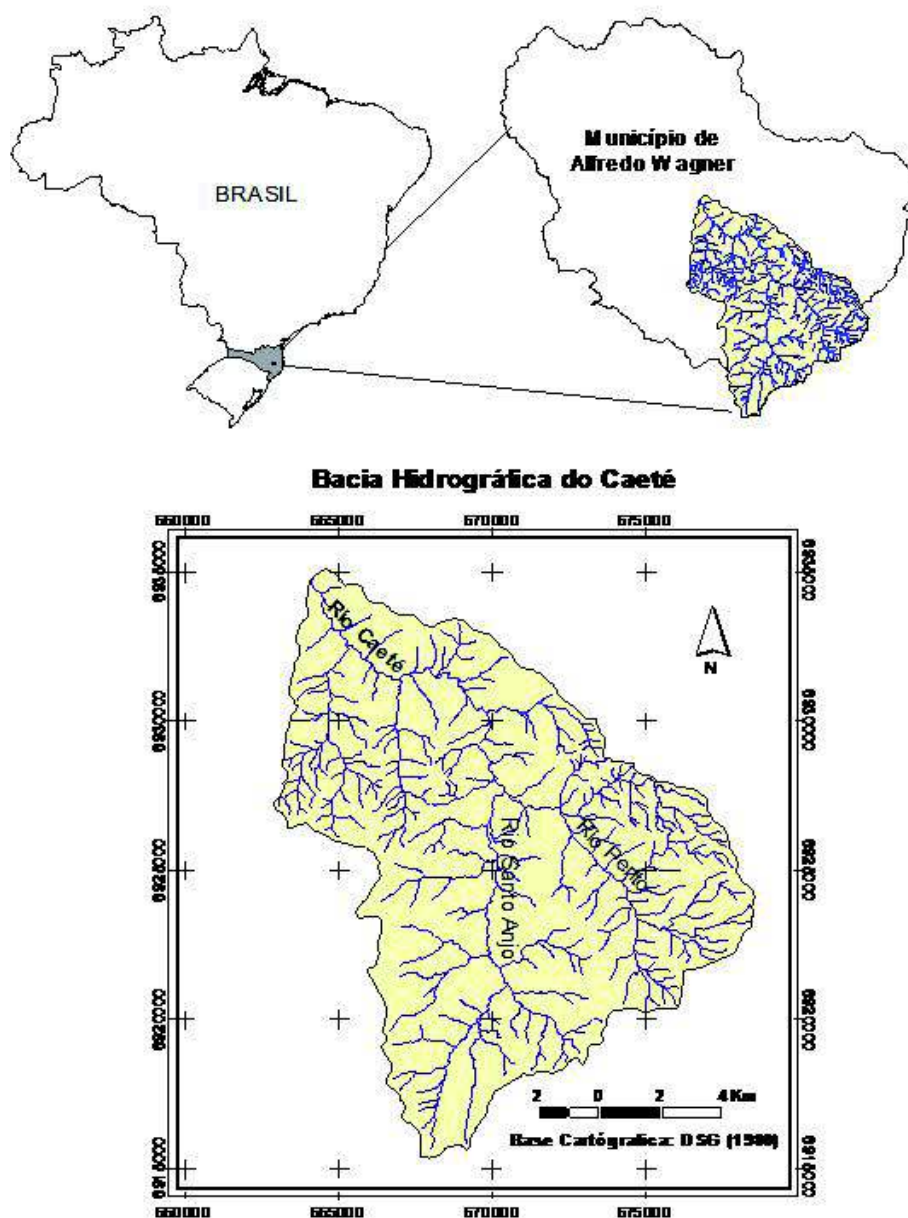


Figura 1 - Localização da bacia do Rio Caeté

As chuvas são abundantes e distribuídas ao longo do ano, não se distinguindo um período seco (MONTEIRO, 1963). A temperatura média anual fica em torno de 19°C, apresentando oscilações que variam de -2° (inverno) a 30°C (verão), com a ocorrência de geadas nos meses de inverno. A precipitação média anual fica em torno de 1.700mm, com maiores incidências na primavera e no verão. A umidade relativa média do ar é de 85% (SANTA CATARINA, 1986).

De acordo com Shimizu et al. (1995), a geologia na bacia do Rio Caeté é constituída praticamente por camadas horizontais de arenito, siltitos, argilitos e folhelhos pertencentes à Bacia do Paraná. Na bacia encontram-se depósitos colúvio-aluvial, formados basicamente por sedimentos areno-argilosos com grânulos e seixos com litologias predominantemente quartzíticas, depositadas em fluxos de regimes torrenciais (HERRMANN e ROSA, 1991).

Nas regiões hipsometricamente mais baixas aparecem rochas mais antigas, do período Permiano da era Paleozóica, do Super-Grupo Tubarão, através do Grupo Itararé, pela formação Rio do Sul, com seus folhelhos, argilitos, siltitos e arenitos. A montante destas e na porção oeste da bacia ocorre o aparecimento da formação Rio Bonito e Palermo, ambos do Grupo Guatá, pertencentes ao Super-Grupo Tubarão (DNPM, 1994).

À medida que se segue a montante e com o aumento das altitudes, principalmente na porção leste que compreende a sub-bacia do Rio Santo Anjo, encontram-se mudanças nas formações geológicas com o aparecimento do Grupo Passa Dois (Período Permiano da Era Paleozóica), que compreende cronologicamente as formações Irati, Serra Alta, Teresina e Rio do Rastro. Nos pontos mais elevados, encontra-se o surgimento do Grupo São Bento, através das formações Botucatu e Serra Geral, pertencente a feições geológicas mais recentes dos períodos Triássico, Jurássico e Cretáceo da era Mesozóica (DNPM, 1994).

Os solos presentes na bacia do Rio Caeté, de acordo com Checchia (2005), estão associados principalmente a Cambissolos e Neossolos, apresentando fertilidade natural muito baixa decorrente da alta alcalinidade.

Os Neossolos, de acordo com Checchia (2005), apresentam espessura em torno de 50 cm beneficiando o escoamento em superfície, gerado pela rápida saturação do solo e em subsuperfície, na zona de contato solo-rocha. Diante disso, o referido solo é facilmente erodível, principalmente em encostas íngremes e desprovidas de vegetação.

O uso da terra é caracterizado por matas nativas, pastagens, solos expostos e cultivos. A principal atividade agrícola é o cultivo da cebola, associada geralmente com lavouras de feijão e milho, no geral, em pequenas propriedades.

SINMAP (STABILITY INDEX MAPPING)

Para o estudo, utilizou-se o modelo SINMAP (Stability Index MAPping), para se determinar o índice de estabilidade das vertentes, com base no modelo de encosta estável infinito (HAMMOND et al., 1992; MONTGOMERY e DIETRICH, 1994) e em variáveis hidrológicas (BEVEN e KIRKBY, 1979).

O SINMAP é baseado no modelo infinito de estabilidade de declive, expresso por meio da razão entre as tensões responsáveis pela saturação do material da encosta e as tensões responsáveis por sua estabilização.

De acordo com Pack et al. (1998), o SINMAP apresenta resultados significativos nos estudos de previsão de perigos (geohazard), controlados pela dinâmica do fluxo de água. Os autores destacam que a exatidão dos dados gerados depende da exatidão do modelo digital do terreno e de inventários de campo dos deslizamentos (landslide) ocorridos. A identificação em campo de locais de deslizamentos permite verificar os resultados gerados a partir do SINMAP.

MODELO DE ESTABILIDADE DE ENCOSTA INFINITO (INFINITE SLOPE STABILITY MODEL)

O fator de segurança (FS) da estabilidade da encosta infinito é dado por (HAMMOND et al, 1992):

$$FS = \frac{C_r + C_s + \cos^2 \theta [\rho_s g (D - D_w) + (\rho_s g - \rho_w g) D_w] \tan \phi}{D \rho_s g \sin \theta \cos \theta} \quad (1)$$

Onde C_r é a coesão das raízes (N/m²), C_s é a coesão do solo (N/m²), θ é o ângulo de declividade, ρ_s é densidade do solo úmido (kg/m³), ρ_w é a densidade da água (kg/m³), g é a força gravitacional (9,81 m/s²), D é altura vertical do solo (m), D_w é a altura vertical do nível de água dentro da camada de solo (m), e ϕ é o ângulo fricção interno do solo. O ângulo da declividade

θ é o arco da tangente da declividade, S , expresso pela queda decimal por unidade horizontal de distância. A Figura 2 ilustra a geometria assumida na equação (1).

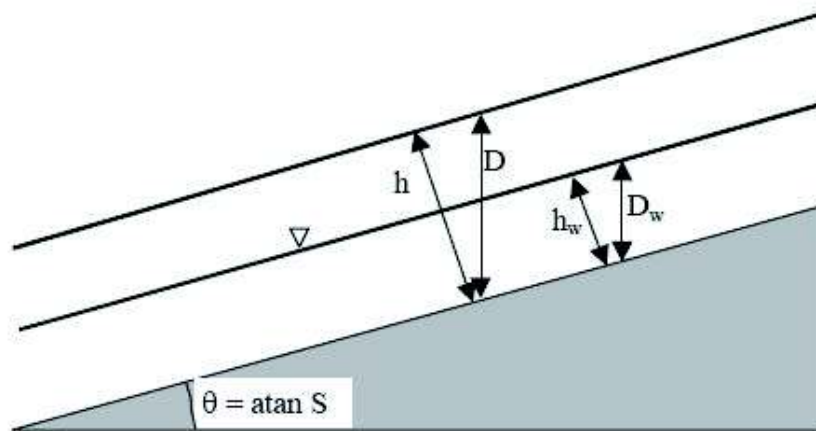


Figura 2 - Modelo esquemático de estabilidade de encosta infinito

Uma das suposições do modelo é considerar a espessura do solo a partir da declividade, onde a espessura do solo, h (m), e a profundidade estão relacionadas como segue:

$$h = D \cos \theta \quad (2)$$

Dessa forma, a equação (1) é simplificada para:

$$FS = \frac{C + \cos \theta [1 - wr] \tan \theta}{\sin \theta} \quad (3)$$

onde

$$w = \frac{D_w}{D} = \frac{h_w}{h} \quad (4)$$

é a umidade relativa,

$$C = \frac{(C_r + C_s)}{(h \rho_s g)} \quad (5)$$

é a combinação da menor dimensão relativa de coesão para a espessura perpendicular do solo, e

$$r = \frac{\rho_w}{\rho_s} \quad (6)$$

é a taxa de densidade da água e do solo.

A equação (3) é adequada porque a coesão (propriedade das raízes e do solo) é combinada com

a densidade e espessura do solo, para um fator de coesão dimensionado, C , equação (5). Isto pode ser explicitado como a relação entre a força de aderência e o peso do solo (Figura 3). O segundo termo no numerador de equação (3) quantifica a contribuição para a estabilidade devido à fricção interna da terra (quantificado pelo ângulo de fricção, ϕ , ou coeficiente de fricção, $\tan \phi$). Isto é reduzido com o incremento da umidade e , conseqüentemente, a força normal devida à matriz do solo. A sensibilidade para este efeito é controlada pela relação de densidade, r , equação (6).

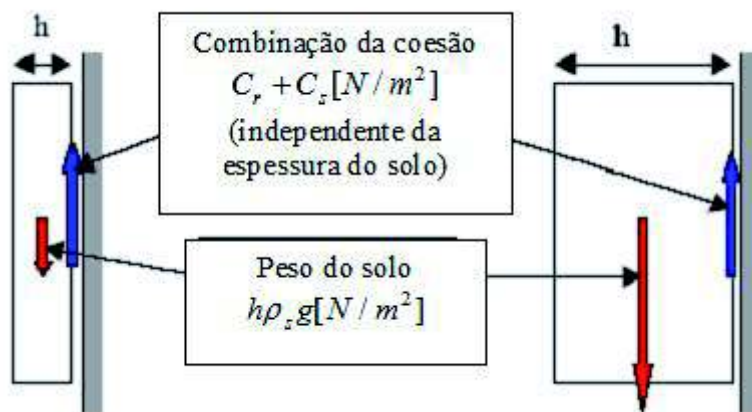


Figura 3 - Ilustração da concepção para se dimensionar o fator de coesão

De modo geral, o modelo determina o declive e a umidade para cada ponto da grade, e assume praticamente que os outros parâmetros são constantes (ou tem distribuições de probabilidade constantes) em cima de áreas maiores, e que a espessura de solo é constante e perpendicular ao declive.

ÍNDICE DE UMIDADE TOPOGRÁFICA

A área da bacia específica (specific catchment área), 'a', definida pela relação entre a área de contribuição por unidade de contorno (m^2/m) (Figura 4) representa um marco no desenvolvimento da hidrologia recente (BEVEN e KIRKBY, 1979). Esta passa a representar o escoamento por saturação do solo (BEVEN e KIRKBY, 1979; O'LOUGHLIN, 1986; MOORE et al., 1988; GRAYSON et al., 1992a; GRAYSON et al., 1992b).

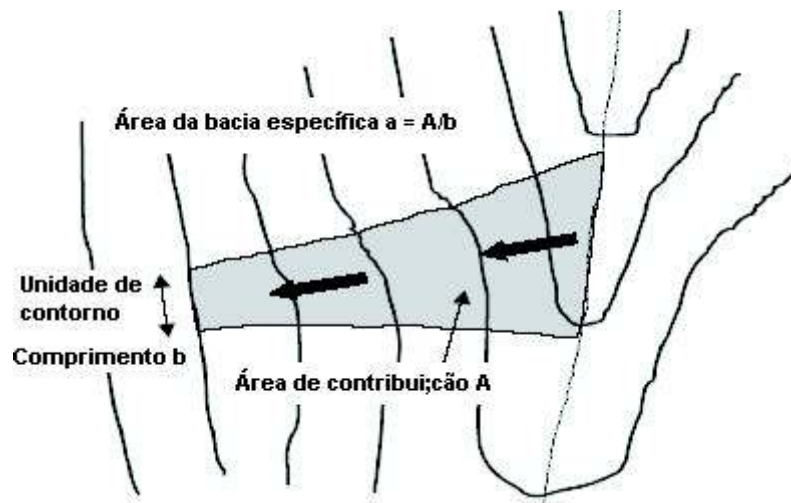


Figura 4 - Definição de área da bacia específica

Neste sentido, Montgomery e Dietrich (1994) apontam que os deslizamentos e escorregamentos se originam dentro de áreas de convergência topográfica.

O TOPMODEL (TOPography-based hydrological MODEL) foi um dos primeiros modelos hidrológicos a incorporar o índice de umidade topográfica, por meio das seguintes hipóteses:

1. O escoamento subsuperficial segue gradientes topográficos, ou seja, a área que contribui para o fluxo é determinada pela área da bacia específica definida pela topografia (Figura 4).

2. A descarga lateral de cada ponto está em equilíbrio com uma taxa de recarga que contribui para a área saturada, R (m/h), obtida por sucessivas representações de estados uniformes (steady-state).

3. A capacidade de fluxo lateral em cada ponto é q , onde $T^{\sin \theta}$ é a transmissividade do solo (m^2/h).

Diante das hipóteses (1) e (2) a descarga lateral, q , é dada integrando-se a profundidade pelo comprimento da unidade de contorno [m^2/h], sendo:

$$q = Ra \quad (7)$$

Diferentemente do TOPMODEL (BEVEN e KIRKBY, 1979), não se assume que a condutividade hidráulica diminua com a profundidade. A condutividade é assumida como uniforme para o manto de solo que excede relativamente à camada de rocha impermeável. Além disso, usa-se seno em lugar da tangente. Isto está mais correto porque a distância de fluxo está de fato ao longo do declive. A diferença entre tangente e seno, que é insignificante para ângulos pequenos, pode dar origem a deslizamentos de terra nos declives íngremes. Assim, supõe-se (3) que a umidade relativa é:

$$w = \text{Min} \left(\frac{Ra}{T \sin \theta}, 1 \right) \quad (8)$$

A umidade relativa nas regiões que apresentam escoamento por saturação, assume valor superior a 1. Como ilustrado na Figura 2, a umidade relativa define a profundidade relativa do nível de água dentro da camada do solo.

A relação R/T [m^1], na equação (8), quantifica a umidade relativa que contribui para a área saturada, a taxa de recarga lateral, por sucessivas representações de estados uniformes (steady-state). Apesar do termo 'steady-state' ser usado para determinar o fluxo lateral, equação (7), o valor de R não representa a média de recarga de longos períodos (por exemplo: anual). Para períodos críticos, com grande recarga efetiva, as áreas saturadas podem ativar deslizamentos de solo. A relação R/T

é um parâmetro que combina fatores climáticos e hidrológicos. O valor do $\sin(T/R)[m]$ pode ser suposto como o comprimento da encosta (plana, não convergente) requerido para desenvolver saturação nos períodos de pluviosidade crítica. Este conceito pode ser útil para estabelecer estimativas de campo de R/T , por meio da identificação dos limites de saturação de superfície.

ÍNDICE DE ESTABILIDADE

O índice de estabilidade é definido por meio da incorporação do índice de umidade topográfico na equação (8):

$$FS = \frac{C + \cos\theta \left[1 - \min \left(\frac{R}{T} \frac{a}{\sin\theta}, 1 \right) \right] r \tan\theta}{\sin\theta} \quad (9)$$

As variáveis a e θ são decorrentes da topografia e C , $\tan\theta$, r e R/T parâmetros. O valor de r é praticamente constante (com um valor igual a 0,5), porém as especificações dos limiares inferior e superior permitem definir a maior distribuição probabilística uniforme, com valores que podem variar aleatoriamente. Os valores de $R/T = x$, $\tan\theta = t$, sendo a distribuição das probabilidades uniformes, com limites inferiores e superiores:

$$\begin{aligned} C &\sim U(C_1, C_2) \\ x &\sim U(x_1, x_2) \\ t &\sim U(t_1, t_2) \end{aligned} \quad (10)$$

O menor valor de C e t , (C_1 e t_1), juntamente com o maior de x (x_2) define os piores casos (mais conservadores), o cenário abaixo destes assume a incerteza (variabilidade) dos parâmetros. As regiões que apresentam os piores cenários possuem valor de $FS > 1$ e são incondicionalmente estáveis. Estas são definidas pela equação:

$$SI = FS_{\min} = \frac{C_1 + \cos\theta \left[1 - \min \left(x_2 \frac{a}{\sin\theta}, 1 \right) \right] t_1}{\sin\theta} \quad (11)$$

Para as regiões onde o $FS_{\min} < 1$, há uma possibilidade (probabilidade) de fracasso (escorregamento). Esta é uma probabilidade espacial decorrente das incertezas (variabilidade espacial) em C , $\tan\theta$ e T . Esta probabilidade tem um elemento temporal (R) que pode variar com o tempo. Dessa forma, a incerteza em x , combinada às probabilidades espaciais e temporais, apresentam áreas com $FS_{\min} < 1$ definidas por:

$$SI = \text{Prob}(FS > 1) \quad (12)$$

A partir da distribuição de C , x e t (equação 10), para o melhor cenário, $C = C_2$, $x = x_1$ e $t = t_1$, conduzem para:

$$SI = FS_{\max} = \frac{C_2 + \cos\theta \left[1 - \min \left(x_1 \frac{a}{\sin\theta}, 1 \right) \right] r k_2}{\sin\theta} \quad (13)$$

Neste caso, então:

$$SI = \text{Prob}(FS > 1) = 0 \quad (14)$$

As regiões com $SI > 1$, $0 < SI < 1$ e $SI = 0$ são ilustradas na Figura 5, em espaços definidos pela relação dos termos declividade (\tan) e área da bacia específica (a). O índice de estabilidade (SI) é definido como a probabilidade que cada local (pixel) apresenta a estabilidade. Na Tabela 1, mostra-se as classes de estabilidade definidas por Pack et al. (1998), subjetivamente, de acordo com os valores de SI (1,5, 1,25, 1, 0,5, 0,0).

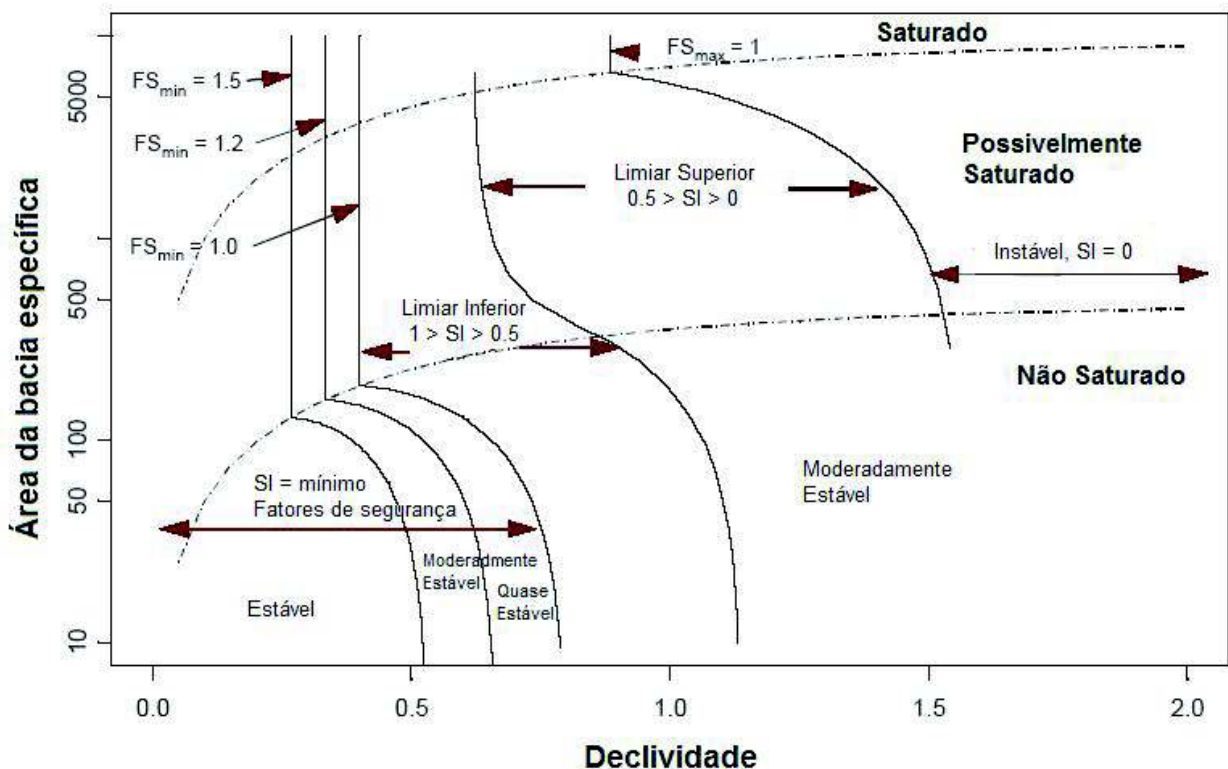


Figura 5 - Índice de estabilidade

Tabela 1 – Definição das classes de estabilidade

Condição	Classe	Predição do estado (Zona)	Variabilidade dos parâmetros	Possível influência dos fatores
$SI > 1,5$	1	Estável	Não influenciam na instabilidade	Necessidade de fatores desestabilizantes significativos, para a instabilidade
$1,5 > SI > 1,25$	2	Moderadamente estável	Não influenciam na instabilidade	Fatores desestabilizantes moderados são requeridos para a instabilidade
$1,25 > SI > 1,0$	3	Quase estável	Não influenciam na instabilidade	Fatores desestabilizantes secundários podem conduzir a instabilidade
$1,0 > SI > 0,5$	4	Limiar inferior de estabilidade (<i>lower threshold</i>)	Pessimista – influenciam em 50% da instabilidade	Fatores desestabilizantes não são requeridos para a instabilidade
$0,5 > SI > 0,0$	5	Limiar superior de estabilidade (<i>upper threshold</i>)	Otimista – influenciam em 50% da estabilidade	Fatores estabilizantes podem ser responsáveis pela estabilidade
$0,0 > SI$	6	'Defended slope'	Não influenciam na estabilidade	Fatores estabilizantes são requeridos para a estabilidade

Os parâmetros definidos no SINMAP pelo limiar inferior e superior caracterizam as regiões, considerando a gamas de incerteza. O parâmetro 'defended slope' é utilizado para definir uma região instável, diante da declividade, independente dos demais parâmetros especificados.

MATERIAIS, VARIÁVEIS E PARÂMETROS UTILIZADOS

O SINMAP classifica o grau de estabilidade dos terrenos por meio da declividade, da área da bacia específica e de parâmetros que quantificam as propriedades materiais (coesão) e o clima (umidade hidrológica). Cada um desses parâmetros é delineado em uma grade numérica da área de estudo.

A base cartográfica foi obtida a partir das cartas topográficas, com equidistância entre as curvas de nível de 20 metros, do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (Tabela 2).

Tabela 2 - Descrição das cartas topográficas utilizadas

MI	Índice de nomenclatura	Nome da folha	Editor	Escala
2908-1	SG.22-Z-D-IV-1	Alfredo Wagner	IBGE	1:50.000
2908-2	SG.22-Z-C-IV-2	Rancho Queimado	IBGE	1:50.000
2908-3	SG.22-Z-C-IV-3	Bom Retiro	IBGE	1:50.000
2908-4	SG.22-Z-C-IV-4	Anitápolis	IBGE	1:50.000

O software ArcView 3.2a foi utilizado para integrar os dados em um Sistema de Informação Geográfica (SIG). A extensão SINMAP (sinmap.dll e sinmap.avx), desenvolvida por Pack et al. (1998), foi usada na modelagem do grau de instabilidades das encostas.

As variáveis topográficas são automaticamente computadas do modelo de elevação digital (DEM), gerado a partir dos dados topográficos (curvas de níveis e pontos cotados), com resolução de 10 x 10 metros.

Diante da incerteza espacial dos demais parâmetros, eles são especificados no SINMAP em termos de limiar superior e inferior. Os parâmetros utilizados para a bacia hidrográfica do Caeté são especificados na Tabela 3.

Os trabalhos de campo realizados pautaram-se no levantamento da localização de deslizamentos ocorridos na bacia hidrográfica do Caeté, com o auxílio de um GPS de navegação (Global Positioning System).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

As declividades na bacia do Rio Caeté são acentuadas, estando as maiores declividades principalmente nas nascentes do Rio Santo Anjo. As declividades acima de 45% representam aproximadamente 20% da área da bacia (Figura 6 e Tabela 4).

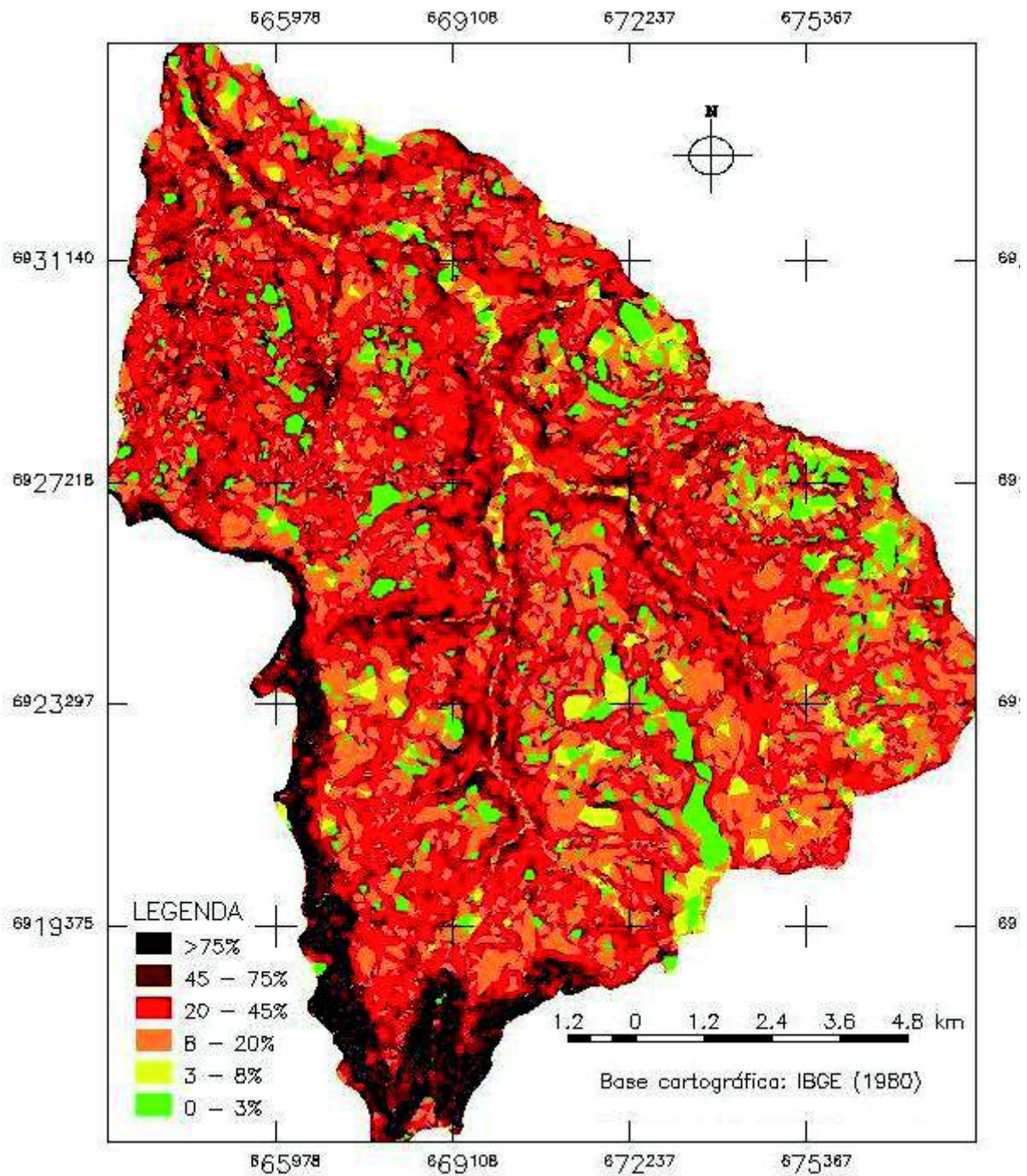


Figura 6 – Declividade na BHC

A figura 7 mostra os dados obtidos a partir do Modelo Digital do Terreno (resolução 10 x 10 metros) e de três deslizamentos inventariados em campo. Nela, verifica-se que dois dos deslizamentos observados estão localizados em regiões que apresentam SI entre 0,5 e 0,0, enquadrando-se na classe limiar superior (upper threshold). Essas regiões apresentam-se suscetíveis à ocorrência de deslizamentos e escorregamentos.

Tabela 3 – Parâmetros utilizados no SINMAP

Parâmetro	Valor adotado	Unidade
T/R (limiar inferior) – maior valor atribuído à relação entre a taxa de transmissividade e de recarga efetiva	2000	m
T/R (limiar superior) - menor valor atribuído à relação entre a taxa de transmissividade e de recarga efetiva	3000	m
Coesão (limiar inferior) – menor valor atribuído para a coesão do solo e de raízes	0,0	adimensional
Coesão (limiar superior) - maior valor atribuído para a coesão do solo e de raízes	0,25	adimensional
Ângulo de fricção do solo (limiar inferior)	30	graus [°]
Ângulo de fricção do solo (limiar superior)	45	graus [°]

Os referidos deslizamentos estão localizados pelas coordenadas UTM (673538; 6925020) (Figura 8) e (668997; 6931277) e são caracterizados por declividade acentuada (ver Figura 7), em região utilizada para a atividade agrícola (cultivo da cebola) e pastagem, respectivamente. Verifica-se, neles, a presença de matações em superfície.

Tabela 4 - Áreas das classes de declividade da BHC

Classe de declividade	Área (km ²)	% Total da bacia
0 – 3 %	10,52	6,4
3 – 8 %	6,68	4,1
8 – 20 %	43,79	26,7
20 – 45 %	70,43	43
45 – 75 %	24,57	15
> 75 %	7,96	4,8
Total	163,95	100

O processo dinâmico de formação da paisagem é evidente na bacia, onde deslizamentos ocorrem frequentemente com a mobilização de matações que são depositados em áreas menos íngremes.

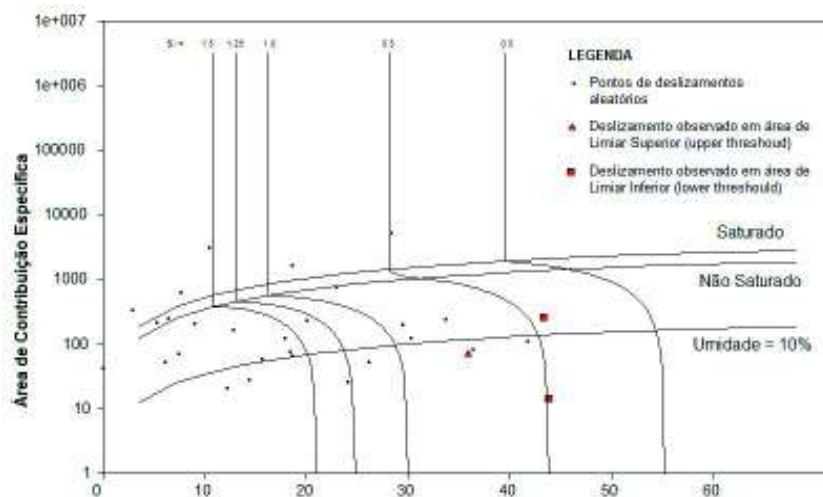


Figura 7 - Análise do índice de estabilidade da bacia hidrográfica Caeté

O deslizamento que apresentou valor de SI entre 1,0 e 0,5, classe de limiar inferior, situa-se na porção central da bacia, nas coordenadas UTM (669041; 6930441). Neste, observou-se que o corte realizado na vertente para locação da estrada favoreceu a instabilidade da encosta.

No que se refere à localização dos pontos inventariados de deslizamentos, em relação com o grau de saturação estimado pelo SIMAP, verifica-se que dois dos três deslizamentos ocorreram em região com umidade inferior a 10%.



Figura 8 – Deslizamento rotacional na bacia do Rio Caeté ($0,5 > SI > 0,0$) (Foto: autor)

Na tabela 5 são apresentados dados estatísticos obtidos a partir da Figura 6. Nesta, constata-se que as regiões estáveis correspondem a 63,8% da área da bacia hidrográfica do Caeté. Constata-se também que 10,3 e 10,6%, da área da bacia apresentam encostas com índice moderadamente estável e quase estável, respectivamente, enquanto que 0,7 % apresentam-se extremamente instáveis, principalmente pela elevada declividade. Também que 13 e 1,6% da área apresenta classes de estabilidade limiar inferior e superior, respectivamente, onde qualquer intervenção humana na paisagem, seja a retirada da cobertura vegetal, a construção de estradas, a prática agrícola, entre outras práticas, pode induzir os deslizamentos e escorregamentos, porque ocorre a desestabilização e o desequilíbrio das encostas.

A distribuição do índice de estabilidade das vertentes na BHC é dada pela figura 9. Na BHC, as encostas suscetíveis a deslizamentos encontram-se, de certa forma, distribuídas por toda a bacia, destacando-se o extremo sul e sudoeste, próximos às principais nascentes do Rio Caeté, onde o grau de estabilidade é muito frágil, principalmente pela presença de encostas extremamente íngremes. Observa-se também que os cursos fluviais estão em vales estreitos (encaixados) e são os principais responsáveis, nesta região, pelos processos de modelação da paisagem, porque próximas às suas margens verificam-se áreas com certo grau de fragilidade nas encostas.

A figura 10 apresenta, espacialmente, a influência da dinâmica hidrológica, por meio do nível de umidade dos terrenos. Nesta, as classes mapeadas foram: zona de saturação, limiar de saturação, parcialmente úmido e baixa umidade. A zona de saturação compreendeu 23,2% da área da bacia. Na bacia, a classe que predominou foi a das áreas parcialmente úmidas, 54,4% desta (Tabela 6).

As áreas saturadas encontram-se principalmente próximas aos cursos fluviais, havendo depressões que acumulam a água proveniente das áreas de contribuição. Este grau de umidade, representado no SINMAP, é influenciado diretamente pelo índice de umidade topográfico. O grau de umidade presente na encosta é de extrema importância na determinação da estabilidade da mesma, pois o grau de umidade favorece a deflagração dos movimentos de massa, principalmente durante a ocorrência de eventos pluviométricos críticos.

Tabela 5 – Dados estatísticos para cada classe estabilidade

Classe	Área (km ²)	% da bacia
Estável	104,7	63,8
Moderadamente Estável	16,9	10,3
Quase Estável	17,3	10,6
Limiar Inferior (<i>lower threshold</i>)	21,3	13,0
Limiar Superior (<i>upper threshold</i>)	2,7	1,6
'Defended'	1,1	0,7
Total	164,0	100

A associação das características geológicas (geologia diversificada com presença de falhas), geomorfológicas (relevo escarpado com o predomínio de vertentes retilíneas e declividade elevadas), pedológicas (solos rasos), hidrológicas (chuvas torrenciais, grande concentração de fluxo) e atividades de intervenção humana (retirada da vegetação, pisoteio do gado, construção de estradas) são as principais condicionantes dos deslizamentos na BHC.

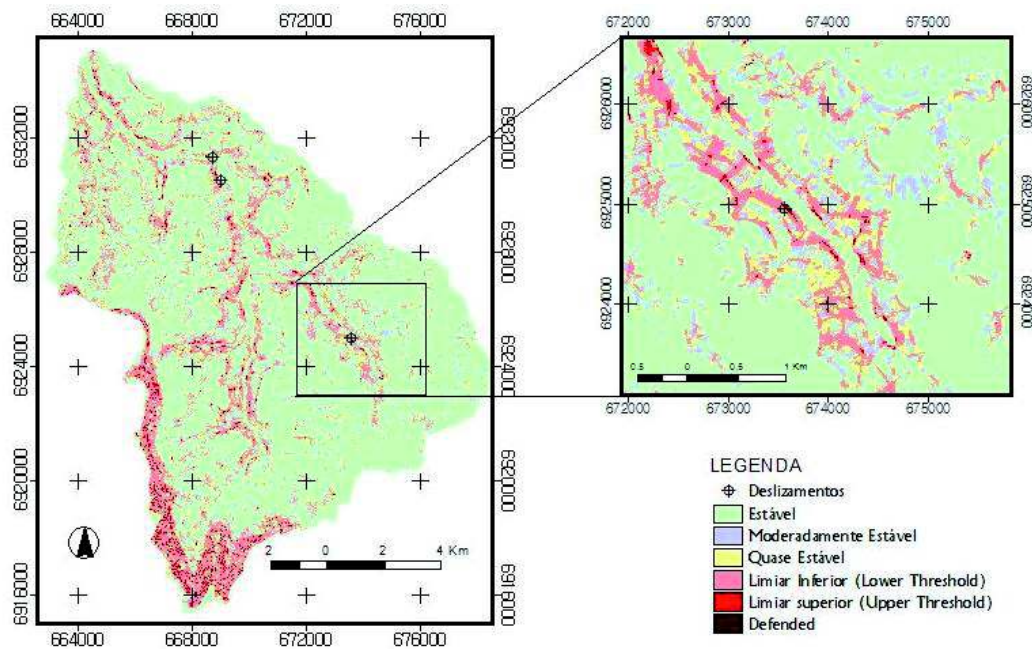


Figura 9 - Índice de estabilidade

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A identificação das áreas de risco a deslizamentos e escorregamentos subsidia ações preventivas e a tomada de decisões. As áreas com elevada instabilidade e que são extremamente susceptíveis à ocorrência de movimento de massa na bacia hidrográfica do Caeté compreendem mais de 10% da área total da bacia (classes: defended, limiar superior e inferior de estabilidade). Essas áreas devem ser preservadas das atividades humanas, pois são naturalmente instáveis. Nas demais áreas, com exceção das estáveis, as atividades humanas devem ser realizadas com cautela e considerando a possibilidade de ocorrência de deslizamentos e escorregamentos.

O modelo SINMAP mostrou-se uma ferramenta pertinente na identificação do grau de estabilidade das vertentes, porque se constitui em um modelo de fácil aplicação, que associa parâmetros topográficos com hidrológicos, por meio da área de contribuição específica e da declividade.

Tabela 6 – Dados estatísticos para cada classe de umidade

Classe	Área (km ²)	% da bacia
Zona de Saturação	38,0	23,2
Limiar de Saturação	6,6	4,0
Parcialmente Úmido	89,2	54,4
Baixa Umidade	30,2	18,4
Total	164,0	100

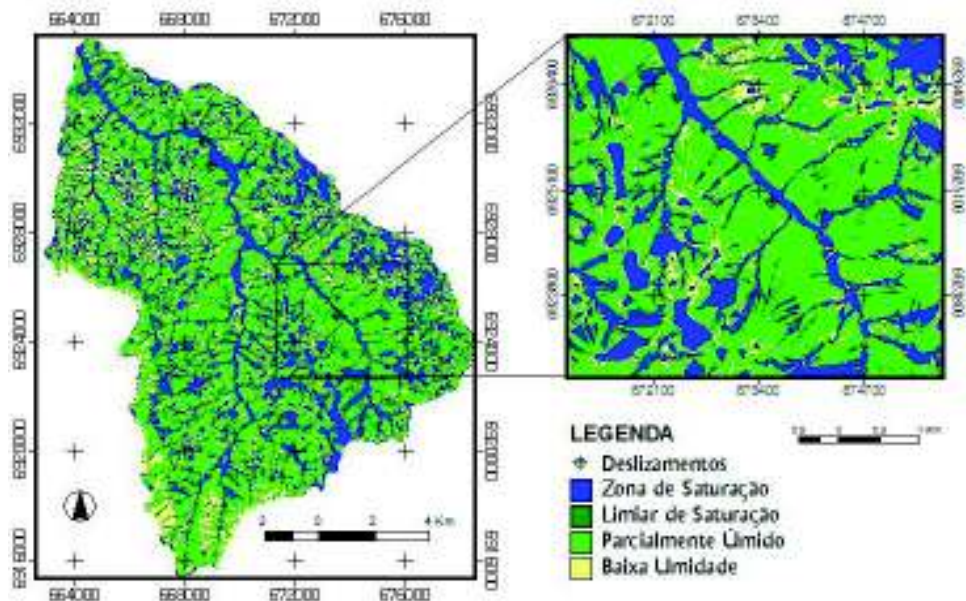


Figura 10 - Umidade dos terrenos

Por fim, destaca-se que o mapeamento do índice de estabilidade das vertentes a deslizamentos na BHC é preliminar e que medições em campo são necessárias, principalmente, para determinação da taxa de transmissividade e de recarga efetiva, coesão do solo e de raízes e ângulo de fricção do solo de forma a representar espacialmente os diferentes ambientes.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento da pesquisa. Ao Prof. Dr. Masato Kobiyama pelo apoio.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. A Physically Based Variable Contributing Area Model of Basin Hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, v. 24, n. 1, p. 43-69, 1979.
- CHECCHIA, T. **Avaliação de Perda de Solo por Erosão Hídrica e Estudo de Emergia na Bacia do Rio Caeté, Alfredo Wagner – Santa Catarina**. Florianópolis, 2005. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina.
- CHECCHIA, T.; KOBİYAMA, M.; SILVA, R.V.; ALVES, A. Análise preliminar da evolução dos deslizamentos no vale do Rio Caeté, Alfredo Wagner, SC. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 5., 2004, Santa Maria. *Anais...* Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2004. 1 CD-ROM
- CHECCHIA, T.; VESTENA, L. R.; KOBİYAMA, M.; SCHRÖDER, P. H. Interação entre climatologia, geologia e geomorfologia na bacia hidrográfica do Caeté, município de Alfredo Wagner, SC. In: XV SEMANA DE GEOGRAFIA, 4., 2006, Guarapuava. *Anais...* Guarapuava: Universidade Estadual do Centro-Oeste, 2006. p. 121-133.

- COROMINAS, J.; COPONS, R.; VILAPLANA, J. M.; ALTIMIR, J.; AMIGÓ, J. Integrated landslide susceptibility analysis and hazard assessment in the Principality of Andorra. **Natural Hazards**, v. 30, p. 421–435, 2003.
- DAI, F. C.; LEE, C. F.; NGAI, Y. Y. Landslide risk assessment and management: an overview. **Engineering Geology**, v. 64, p. 65-87, 2002.
- DNPM. Coluna White. Estratigrafia da Bacia do Paraná no sul do estado de Santa Catarina. In: **Textos básicos de geologia e recursos minerais de Santa Catarina**. n. 4. 1994.
- FERNANDES, N. F.; AMARAL, C. P.; Movimentos de massa: uma abordagem geológico-geomorfológica. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (Orgs.). **Geomorfologia e meio ambiente**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1996. p. 123-194.
- GRAYSON, R. B., MOORE, I. D.; MCMAHON, T. A. Physically Based Hydrologic Modeling 2. Is the Concept Realistic. **Water Resources Research**, v. 28, n. 10, p. 2659-2666, 1992b.
- GRAYSON, R. B.; MOORE, I. D.; MCMAHON, T. A. Physically Based Hydrologic Modeling 1. A Terrain-Based Model for Investigative Purposes. **Water Resources Research**, v. 28, n. 10, p. 2639-2658, 1992a.
- GUERRA, A. T. **Dicionário Geológico Geomorfológico**. 8ª Ed. Rio de Janeiro: IBGE, 1993. 446p.
- GUZZETTI, F.; CARRARA, A.; CARDINALI, M.; REICHENBACH, P. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. **Geomorphology**, v. 31, p. 181-216, 1999.
- HAMMOND, C.; HALL, D.; MILLER, S.; SWETIK, P. Level I Stability Analysis (LISA) Documentation for Version 2.0. General Technical Report INT-285, USDA Forest Service Intermountain Research Station, 1992.
- HERRMANN, M. L P.; ROSA, R. O. **Mapeamento temático do município de Florianópolis - Geomorfologia**. Florianópolis: IPUF/IBGE, 1991.
- MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W. E. A Physically Based Model for the Topographic Control on Shallow Landsliding. **Water Resources Research**, v. 30, n. 4, p. 1153-1171, 1994.
- MOORE, I., O'LOUGHLIN, E. M.; BURCH, G. J. A Contour Based Topographic Model for Hydrological and Ecological Applications. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 13, p. 305-320, 1988.
- O'LOUGHLIN, E. M. Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis. **Water Resources Research**, v. 22, n. 5, p. 794-804, 1986.
- PACK, R. T.; TARBOTON, D. G.; GOODWIN, C. N. **Terrain Stability Mapping with SINMAP, technical description and users guide for version 1.00**. Report Number 4114-0, Terratech Consulting Ltd., Salmon Arm, B.C., Canada, 1988. Disponível em: <www.tclbc.com>. Acesso em: 21 abr. 2008.
- REMONDO, J.; GONZALEZ-DIEZ, A.; DIAZ DE TERAN, J. R.; CENDRERO, A. Landslide Susceptibility Models Utilising Spatial Data Analysis Techniques. A Case Study from the Lower Deba Valley, Guipúzcoa (Spain). **Natural Hazards**, v. 30, p. 267–279, 2003.
- SANTA CATARINA. Gabinete de Planejamento e Coordenação Geral. **Atlas do Estado de Santa Catarina**. Rio de Janeiro, 1986. 173p.
- SANTACANA, N.; BAEZA, C.; COROMINAS, J.; DE PAZ, A.; MARTURIÀ, J. A GIS-based multivariate statistical analysis for shallow landslide susceptibility mapping in La Pobla de Lillet area (Eastern Pyrenees, Spain). **Natural Hazards**, v. 30, p. 281–295, 2003.
- SHIMIZU et al. **Síntese temática: geologia**. In: Projeto Gerenciamento Costeiro: 2º Fase. Florianópolis: IBGE, 1995. 231p. Mapas
- VESTENA, L. R.; CHECCHIA, T.; KOBAYAMA, M. Análise morfométrica da bacia hidrográfica do Caeté, Alfredo Wagner/SC." In: VI SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA REGIONAL CONFERENCE ON GEOMORPHOLOGY, 6., 2006, Goiânia. **Anais/Actes...** Volume II. Goiânia: União da Geomorfologia Brasileira / International Association of Geomorphologists, 2006. 1 CD-ROM

Trabalho enviado em maio de 2009
Trabalho aceito em agosto de 2010