

IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS DE SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS DE ENCOSTA UTILIZANDO O MODELO MATEMÁTICO SHALSTAB

Identification of Landslides Susceptibility Areas Using the Shalstab Mathematical Model

Téhrrie Caroline König Ferraz Pacheco*

Hermann Johann Heinrich Kux*

Rodolfo Moreda Mendes**

***Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE / São José dos Campos, São Paulo**

tehrriekonig@gmail.com / tehrrie.pacheco@inpe.br

hermann.kux@inpe.br

****Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais - CEMADEN / São José dos Campos, São Paulo**

rodolfo.mendes@cemaden.gov.br

RESUMO

Os fenômenos naturais, existentes em todo o nosso planeta, podem acabar em desastres naturais quando há uma relação inadequada entre Homem e Natureza. No Brasil, um dos principais fenômenos que afetam a população são os deslizamentos de terra desencadeados por chuvas intensas. Por conta dos prejuízos econômicos, sociais e a ocorrência de perda de vidas, a identificação e o constante monitoramento de áreas de risco são extremamente importantes. Dessa forma, este trabalho objetiva identificar as áreas suscetível à ocorrência de deslizamentos de terra, no bairro Britador, localizado no município de Campos do Jordão - SP, assim como os principais fatores que favorecem à ocorrência de deslizamentos. Para tanto, foi utilizado o modelo matemático *Shalstab*, que analisa a estabilidade de encostas, imagens de satélite do sensor *WorldView 2*, e técnicas de Mineração de Dados, a fim de identificar as características relacionadas ao uso e ocupação da área em estudo. Foram simulados três cenários de suscetibilidade à deslizamentos, variando os parâmetros de entrada do modelo *Shalstab*. Os resultados gerados pelo modelo matemático são condizentes com a realidade observada neste bairro e comprovada pelas cicatrizes de deslizamento pré-existent. A imagem de satélite permite ainda identificar que as alterações antrópicas em áreas de encosta, são os elementos condicionantes para a ocorrência dos desastres por deslizamento de terra.

Palavras-chave: Desastres naturais. *Shalstab*. *WorldView 2*. Mineração de dados.

ABSTRACT

Natural hazards, occurring all over the World, may become a disaster when humans and nature interact. In Brazil, landslides, triggered by heavy rainfall, are the most common phenomenon that affects the population. Due to the economic and social losses, and deaths, the identification and monitoring risk areas are extremely important. Therefore, this study aims to identify the landslides susceptible areas in Britador neighborhood, located at Campos do Jordão city in São Paulo state. Using the *Shalstab* mathematical model, which analyze the slope stability, and satellite images from *WorldView 2* sensor with Data Mining Techniques, were identified the most susceptible areas and the main characteristics of human occupation. To achieve this goal, three scenarios were simulated, changing the values of the input parameters of *Shalstab*. The results were consistent with the reality observed in the neighborhood and with old landslides scars. The satellite image allowed the identification of different types of human interaction in slope areas with high landslide susceptibility.

Keywords: Natural disasters. *Shalstab*. *WorldView 2*. Data Mining.

1. INTRODUÇÃO

Os movimentos gravitacionais de massa são eventos naturais que podem causar grandes desastres. Agentes do meio físico como os aspectos geológicos, geomorfológicos e pedológicos da área, assim como elevados índices pluviométricos, quando associados com fatores antrópicos, podem gerar situações de risco. Ocupações irregulares em áreas de encostas íngremes e fundos de vale, a retirada da vegetação natural e consequente degradação ambiental, associados com índices pluviométricos elevados e solos saturados, podem desencadear deslizamentos, causando prejuízos econômicos, materiais e perda de vidas.

As técnicas de Sensoriamento Remoto têm mostrado grande eficácia nesses estudos. Imagens de satélites orbitais permitem extrair informações referentes ao relevo, áreas de ocupação e expansão urbana, cicatrizes de deslizamentos, tipo de cobertura vegetal, entre outros. Para estudos urbanos, conforme demonstrado por Pinho *et al.* (2012), há preferência na utilização de imagens de satélites com alta resolução espacial, como o *WorldView 2 e 3*, pois estes sistemas sensores permitem um maior detalhamento das áreas, favorecendo a discriminação detalhada entre alvos distintos.

O município de Campos do Jordão, localizado no alto da serra da Mantiqueira, é uma área importante para os estudos e análises de deslizamentos de terra, devido a sua complexidade geomorfológica que, quando associada com a expansão urbana desordenada, especulação imobiliária e a consequente degradação ambiental, geram a combinação perfeita para a ocorrência desses desastres. Exemplo disso foram os deslizamentos ocorridos em janeiro de 2000, que culminaram na morte de 10 pessoas, deixando mais de 100 machucadas, e 423 casas com severos danos estruturais (MENDES *et al.*, 2018b).

Neste contexto, os objetivos deste trabalho consistem na identificação das áreas de maior suscetibilidade a deslizamentos de terra no bairro Britador, localizado no município de Campos do Jordão – SP, e na identificação dos fatores condicionantes para a ocorrência deste fenômeno. Como ferramentas, utilizou-se o modelo matemático *Shalstab*, imagens de satélite do sensor orbital *WorldView 2* e técnicas de Mineração de Dados.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Os movimentos de massa são transformações nas superfícies que contam com o deslocamento de solos, detritos e blocos rochosos. Estes variam de acordo com o material deslocado, a velocidade, a quantidade de água presente, a forma da ruptura e a deformação resultante. Em decorrência das inúmeras variáveis existentes, cada autor apresenta uma definição diferente de classificação dos tipos de movimentos de massa, como se verifica nos trabalhos de Cruden e Varnes (1996), Vargas e Pichler (1957), Ahrendt (2005), Prieto *et al.* (2017) dentre outros.

No Brasil, a classificação oficial definida pelo COBRADE – Classificação e Codificação Brasileira de Desastres (CENAD, 2013) diz que os movimentos de massa são eventos geológicos podendo ser de 4 tipos, a saber:

- a) Quedas, tombamentos e rolamentos de rochas;
- b) Deslizamento de solo ou rocha;
- c) Corridas de massa;
- d) Subsidência e solapamento.

Entretanto, este trabalho utiliza a definição de Cruden e Varnes (1996), que considera os deslizamentos como porções de solo e rocha que descem as encostas a partir de uma superfície de ruptura. Podem ser classificados em deslizamentos de caráter translacional ou rotacional. Os translacionais ocorrem em superfícies planas e inclinadas, a partir da ruptura entre porções de solo e

o substrato impermeável. As porções do solo referem-se às camadas superficiais, residuais e material transportado (colúvio). Já o substrato impermeável pode ser a rocha matriz, ou camada de solo com baixa permeabilidade e elevado teor de argila (ZÊRERE; TRIGO; TRIGO, 2005; AHRENDT, 2005). Os deslizamentos rotacionais têm como principal característica a deformação côncava da superfície. De modo geral, a massa deslocada está em maior profundidade que nos deslizamentos translacionais.

A identificação das áreas suscetíveis à ocorrência de deslizamentos pode ser feita de diversas formas como, por exemplo, através de análises de campo, mapeamentos geomorfológicos e pedológicos, análises estatísticas, modelos hidrológicos e modelos matemáticos de estabilidade de encosta, como é o caso do *Shalstab*, utilizado nesta pesquisa.

O *Shalstab* (*Shallow Landsliding Stability Model*) proposto por Dietrich e Montgomery (1998), é um modelo matemático para a análise de escorregamentos superficiais (MICHEL; KOBIYAMA; GOERL, 2012). Este utiliza parâmetros topológicos, hidrológicos e outros relacionados com a física e mecânica do solo (REGINATTO et.al., 2012). O modelo calcula o limiar crítico de volume de chuva necessário para que ocorra a ruptura e consequente deslizamento de terra (VIEIRA; RAMOS, 2015). As características naturais do solo podem sofrer alterações em decorrência da ação antrópica, e isso se reflete nos parâmetros físicos que são utilizados pelo modelo, como a coesão, ângulo de atrito, densidade do solo, condutividade hidráulica/transmissividade. Estas alterações devem ser corretamente analisadas e monitoradas, a fim de aplicar no *Shalstab* os parâmetros condizentes com a realidade da área estudada.

A formulação matemática do modelo *Shalstab* (equação 1) é uma associação das fórmulas do modelo de estabilidade de encosta infinita descrita pela lei de Mohr-Coulomb, com o modelo hidrológico de estado uniforme proposto por O'Loughlin (1986).

$$\log\left(\frac{q}{t}\right) = \frac{\text{sen}\theta}{\frac{a}{b}} * \left[\left(\frac{c'}{\rho_w * g * z * \cos^2\theta * \text{tg}(\varphi^1)} \right) + \frac{\rho_s}{\rho_w} * \left(1 - \left(\frac{\text{tg}\theta}{\text{tg}\varphi^1} \right) \right) \right] \quad (1)$$

Sendo:

q = recarga de chuva

t = transmissividade do solo

θ = inclinação (graus°)

a = área (m²)

b = comprimento do contorno (m)

c' = coesão efetiva do solo (kPa)

ρ_s = densidade do solo (kg*m⁻³)

ρ_w = densidade da água (kg*m⁻³)

Para trabalhar com o *Shalstab*, é necessário um Modelo Digital de Terreno (MDT) da área de estudo, assim como os parâmetros referentes à coesão, ângulo de atrito interno, densidade do solo e profundidade da camada do solo. O mapeamento das cicatrizes de escorregamento é outra etapa necessária, que auxilia na validação dos resultados (MICHEL; KOBIYAMA; GOERL, 2012). Para esta tarefa, atualmente utiliza-se imagens orbitais de alta resolução espacial, a fim de facilitar a identificação das cicatrizes. Como resultado, o modelo gera um mapa de instabilidade, baseado em 7 classes de valores, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação do modelo *Shalstab*

Classe	Interpretação das classes
Incondicionalmente Instável	Incondicionalmente Instável Insaturado
$\log q/T < -3,1$	Incondicionalmente Instável Saturado
$-3,1 < \log q/T < -2,8$	Instável Saturado
$-2,8 < \log q/T < -2,5$	Instável Insaturado
$-2,5 < \log q/T < -2,2$	Estável Insaturado
$\log q/T > -2,2$	Incondicionalmente Estável Insaturado
Incondicionalmente Estável	Incondicionalmente Estável Saturado

Fonte: Adaptado de Dietrich e Montgomery (1998).

As classes “Incondicionalmente Instável” e “Incondicionalmente Estável” representam os casos extremos, ou seja, na primeira, apesar da ausência da coluna de água (solo seco) os parâmetros físicos do solo não resistem à declividade acentuada, ocasionando rupturas e deslizamentos. E na segunda, mesmo com solo saturado os parâmetros físicos deste conseguem superar a declividade, não ocasionando deslizamentos (MICHEL; KOBIYAMA; GOERL, 2014). As equações 2 e 3 representam, respectivamente, a formulação matemática das classes Incondicionalmente Instável e Incondicionalmente Estável.

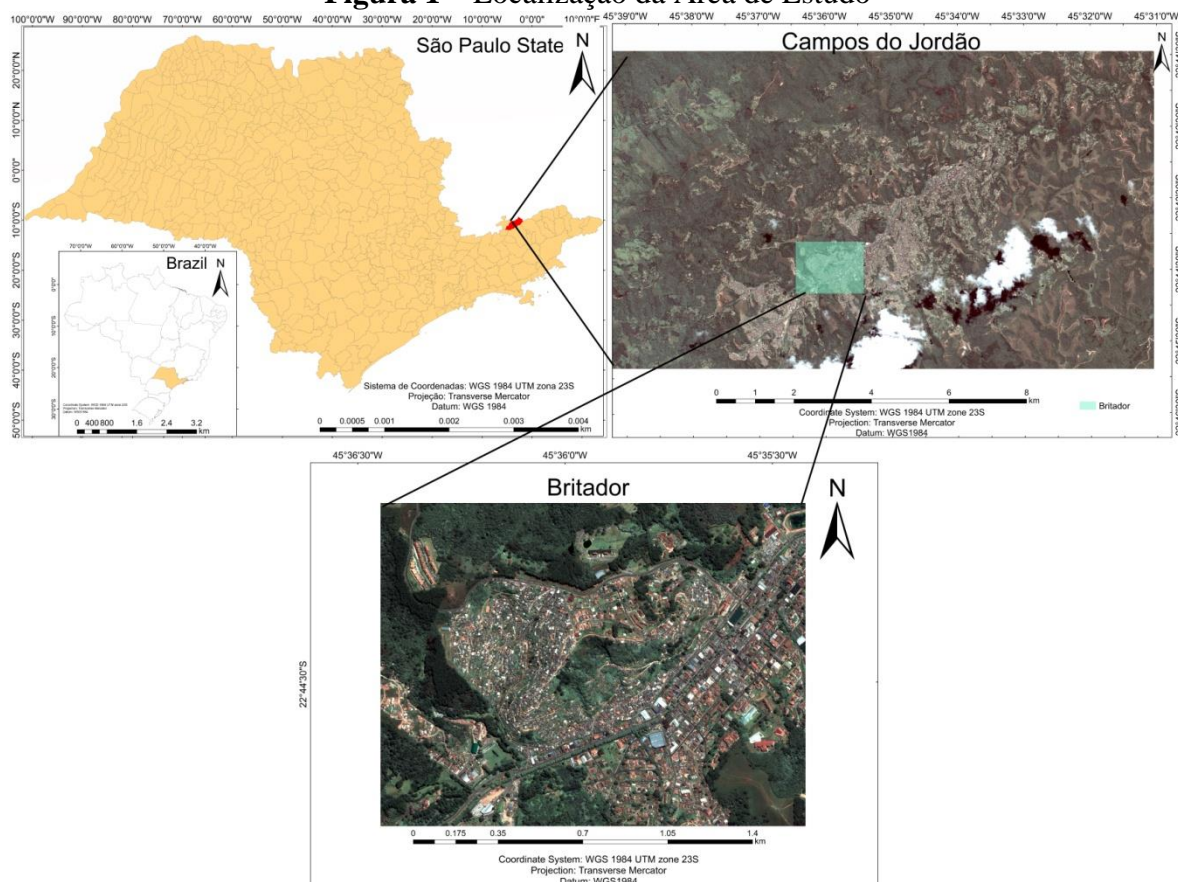
$$\tan\theta \geq \tan\varphi + \left(\frac{c}{\cos^2\theta \cdot \rho_s \cdot g \cdot z}\right) \quad (2)$$

$$\tan\theta \leq \tan\varphi * \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho_s}\right) + \left(\frac{c}{\cos^2\theta \cdot \rho_s \cdot g \cdot z}\right) \quad (3)$$

3. ÁREA DE ESTUDO

O município de Campos do Jordão - SP está centrado nas coordenadas geográficas S 22°44'19", WGr 45°35'32" (Figura 1). De acordo com o IBGE (2017) este município contava com 51.157 habitantes em 2016, tendo uma extensão territorial de 290,520 km². Está localizado no planalto cristalino, com altitudes superiores a 2000 m (MODENESI-GAUTTIERI; HIRUMA, 2004; HIRUMA *et al.*, 2001). O clima caracteriza-se por temperatura média de 14,3°C, com precipitações anuais variando de 1205 mm a 2800 mm (MODENESI-GAUTTIERI; HIRUMA, 2004). O município apresenta feições geomorfológicas expressivas, com muitas áreas de encostas íngremes. Além disso, os solos são altamente argilosos, favorecendo o deslizamento de terra.

Figura 1 – Localização da Área de Estudo



Fonte: Elaborado pela autora (2017).

A ocupação irregular em áreas com acentuada declividade (Figura 2), associado com o baixo padrão construtivo é mais um elemento agravante e facilitador dos deslizamentos. Durante as visitas a campo, observou-se encanamentos de PVC expostos ao tempo (Figura 3). Devido às chuvas, vento e amplitude térmica, os mesmos podem apresentar rachaduras e conseqüentemente vazamentos. Esses vazamentos acabam por auxiliar na saturação do solo, favorecendo no desencadeamento de deslizamentos.

Figura 2 – Deslizamento no Bairro Britador no ano 2000



Fonte: Neto, 2006.

Figura 3 – Exemplo de encanamento a céu aberto e solo saturado



Fonte: Elaborado pela autora (2017).

Entretanto, os motivos que levaram a ocupações irregulares em locais inapropriados para construções estão associados com a forma que ocorreu a expansão urbana do município.

A expansão urbana de Campos do Jordão, iniciada na década de 60 e intensificada nos anos 70, ocorreu a partir de três núcleos principais, a saber: Abernóssia, Jaguaribe e Capivari. Enquanto inicialmente foram ocupadas áreas de declividades pouco acentuadas, como as lombas, com o rápido crescimento populacional, áreas de vertente e anfiteatro também passaram a ser ocupadas, acentuando a degradação ambiental (MODENESI-GAUTTIERI; HIRUMA, 2004). Associado a isso, há um expressivo aumento do turismo na região e, conseqüentemente, especulação imobiliária, dando origem a inúmeros loteamentos, porém sem que haja qualquer tipo de planejamento urbano (GALLO-JUNIOR; OLIVATO; CARVALHO, 2010).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste trabalho, primeiramente foram obtidos dados e parâmetros geotécnicos utilizados no modelo matemático *Shalstab*, sendo eles: ângulo de atrito interno, coesão do solo, densidade e profundidade do solo. Os dados geotécnicos utilizados foram extraídos da literatura, a saber: Ahrendt (2005), Mendes e Valério-Filho (2015), Prieto *et al.* (2017).

O modelo digital de elevação (MDE) foi adquirido do projeto Topodata, realizado no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) por Valeriano (2005), carta 22S465, na escala 1:250.000. Ele foi utilizado tanto no modelo matemático, quanto para a análise das encostas e declividade do terreno. O desenvolvimento do mapa de declividade do bairro em estudo foi realizado com o software *ArcGIS® 10.3* da *ESRI®*. Para este procedimento, foram extraídas as curvas de nível e gerado um arquivo TIN (rede de triângulos regulares). Na sequência, converteu-se o arquivo TIN em uma grade regular, com resolução espacial de 4 metros e gerou-se o mapa de declividade. Este produto foi inserido no modelo *Shalstab*, juntamente com os dados geotécnicos, para gerar os mapas de estabilidade de encosta.

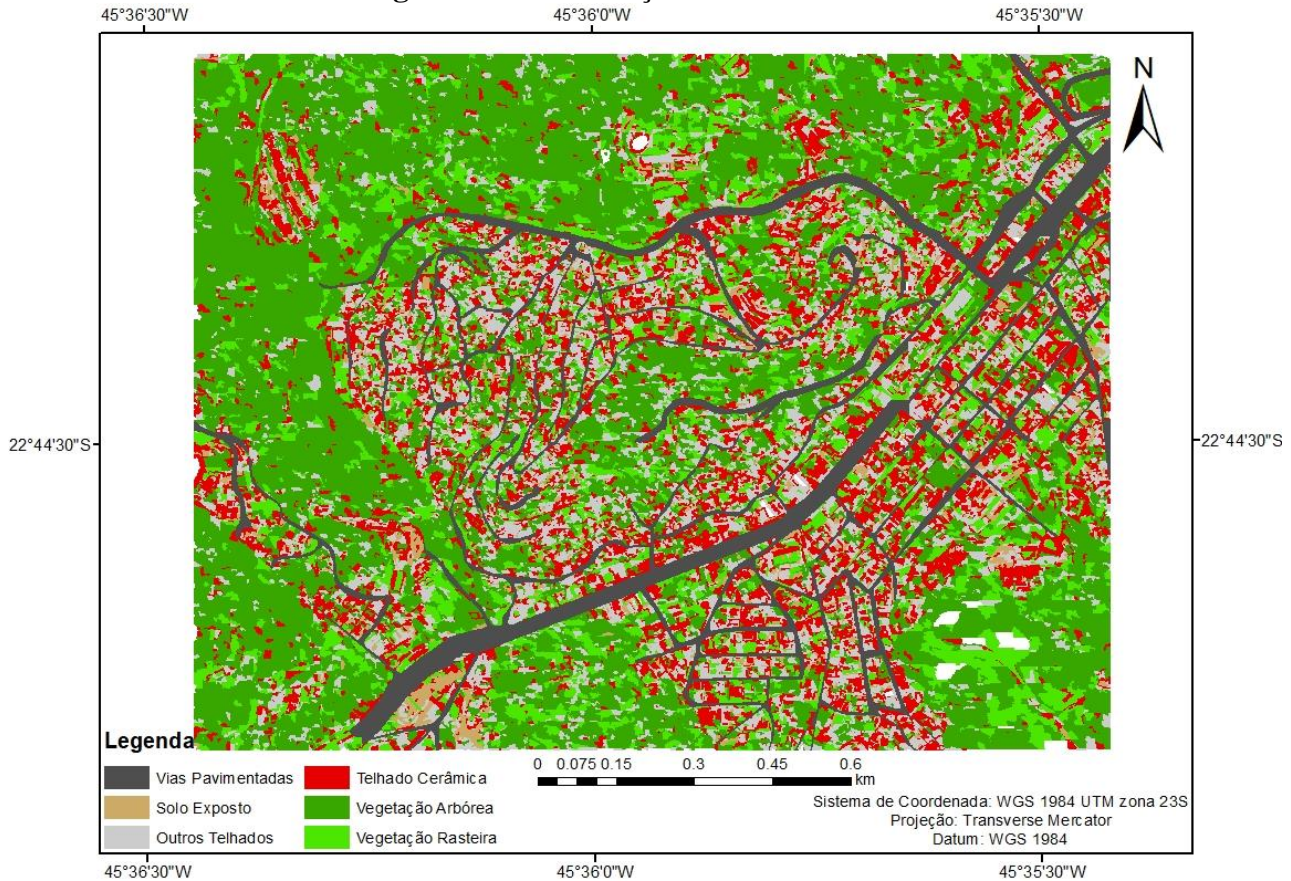
As imagens de satélite usadas são do sensor orbital *WorldView 2*, possuem alta resolução espacial e são datadas de 27 de dezembro de 2014, sendo esta a imagem mais recente com a menor cobertura de nuvens. As imagens passaram pelo pré-processamento, que inclui a fusão das imagens das bandas multiespectrais com a banda pancromática, e a sua ortorretificação, utilizando respectivamente os softwares ENVI e ERDAS Imagine. Para a realização da ortorretificação foram necessários pontos de controle. A aquisição dos pontos de controle (*GCP – Ground Control Points*) foi realizada durante o trabalho de campo no dia 06 de julho de 2017, a partir do aplicativo GPS-status. Na sequência foram testadas as melhores composições RGB com intuito de destacar as feições geomorfológicas, a mancha urbana e as cicatrizes de deslizamento, optando pela composição cor verdadeira R5G3B2.

Para a classificação das imagens do sensor imageador *WorldView 2*, o primeiro passo realizado foi a criação de um *layer* temático contendo as quadras e ruas do bairro Britador. Posteriormente, utilizando este *layer* temático, realizou-se a segmentação em dois níveis: nível 1 para representação correta das quadras e ruas. E o segundo nível, para segmentação de objetos como diferentes tipos de vegetação, telhados e solo exposto. O processo de segmentação foi realizado utilizando o software *eCognition*. Esse software permite a análise semiautomática de dados de Sensoriamento Remoto. Na sequência, executa-se a Mineração de Dados através do algoritmo CART, implementado no *eCognition*. Essa etapa identifica os atributos de maior relevância para o estudo, gerando uma árvore de decisões. Por fim, a classificação da imagem é executada baseando-se nos atributos selecionados pelo algoritmo CART.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir dos limiares definidos pela árvore de decisão gerada na etapa de Mineração de Dados, classificou-se o recorte da área de estudo, conforme apresentado na Figura 4. A Tabela 2 apresenta os dados referentes à matriz de confusão, exatidão global e índice *Kappa*, provenientes dessa classificação.

Figura 4 – Classificação do Bairro Britador



Fonte: Elaborado pela autora (2017).

Tabela 2 – Matriz de Confusão da Classificação do Britador

Classificação/ Referência	Vegetação Arbórea	Outros Telhados	Solo Exposto	Telhado Cerâmica	Vegetação Rasteira	Via Pavimentada	Total	Exatidão do Usuário
Vegetação arbórea	98	1	0	1	10	0	110	0.89
Outros Telhados	0	82	0	0	0	7	89	0.92
Solo exposto	0	1	57	10	3	0	71	0.80
Cobertura cerâmica	0	1	20	122	0	0	143	0.85
Vegetação rasteira	3	0	1	0	66	1	71	0.93
Via pavimentada	0	4	0	0	1	7	12	0.58
Total	101	89	78	133	80	15	496	
Exatidão produtor	0.97	0.92	0.73	0.92	0.83	0.47		
Exatidão Global	0.87							
Índice Kappa	0.61							

Fonte: Elaborado pela autora (2017).

A partir das estatísticas obtidas pela matriz de confusão e pela análise visual, verificou-se que a Mineração de Dados e as respectivas classificações apresentaram resultados satisfatórios. O

índice *Kappa* varia numa escala de -1 a 1, sendo que quanto mais próximo a 1, melhor o resultado, conforme observado na Tabela 3.

Tabela 3 – Classificação do Índice *Kappa*

Índice <i>Kappa</i>	Desempenho
< 0	Péssimo
$0 < k \leq 0,2$	Ruim
$0,2 < k \leq 0,4$	Razoável
$0,4 < k \leq 0,6$	Bom
$0,6 < k \leq 0,8$	Muito Bom
$0,8 < k \leq 1,0$	Excelente

Fonte: Adaptado de Landis e Koch (1977).

Pela análise das Tabelas 2 e 3, conclui-se que as classificações apresentaram desempenho “Bom”. No entanto, observa-se que as classes que apresentaram maior confusão espectral entre si, foram as classes de telhado de cerâmica e solo exposto. Isso se deve à presença de argila tanto na composição da telha de cerâmica, quanto no solo da área. E a classe de solo exposto também apresentou certa confusão espectral com a classe de vegetação rasteira. Isto porque em algumas áreas, a cobertura de vegetação rasteira (gramíneas), não era suficientemente densa, favorecendo uma contribuição espectral do solo subjacente.

As classes de vegetação rasteira e vegetação arbórea apresentaram boa distinção entre si, apesar de apresentarem um comportamento espectral similar. Isso ocorreu pelo fato de diferentes espécies vegetais possuírem tamanhos e portes diferentes, além da diferença entre os respectivos estágios de desenvolvimento.

A partir da imagem do sensor *WorldView 2*, da imagem classificada e sua respectiva matriz de confusão, é possível inferir sobre os aspectos naturais e antrópicos presentes nas áreas em estudo. O bairro do Britador possui 1.270 m² de áreas com algum tipo de cobertura vegetal (30,5% da área total) e 2.890 m² de áreas com algum tipo de intervenção humana (solo exposto, telhados, vias pavimentadas) promovida pela forma de uso e ocupação do solo, conforme observado na Tabela 4. A cobertura vegetal desempenha um papel importante no processo de infiltração da água da chuva, atenuando o avanço da frente de umedecimento no perfil de solo, evitando que o mesmo atinja a saturação rapidamente, além de proteger o solo contra processos erosivos.

Tabela 4 – Área de cada Classe da Classificação

Classes	Área em m ²	Área (%)
Solo Exposto	72	1,7
Telhado de Cerâmica	369	8,9
Outros Telhados	356	8,6
Vegetação Arbórea	961	23,1
Vegetação Rasteira	309	7,4
Vias Pavimentadas	2.093	50,3
TOTAL	4.160	100

Fonte: Elaborado pela autora (2017).

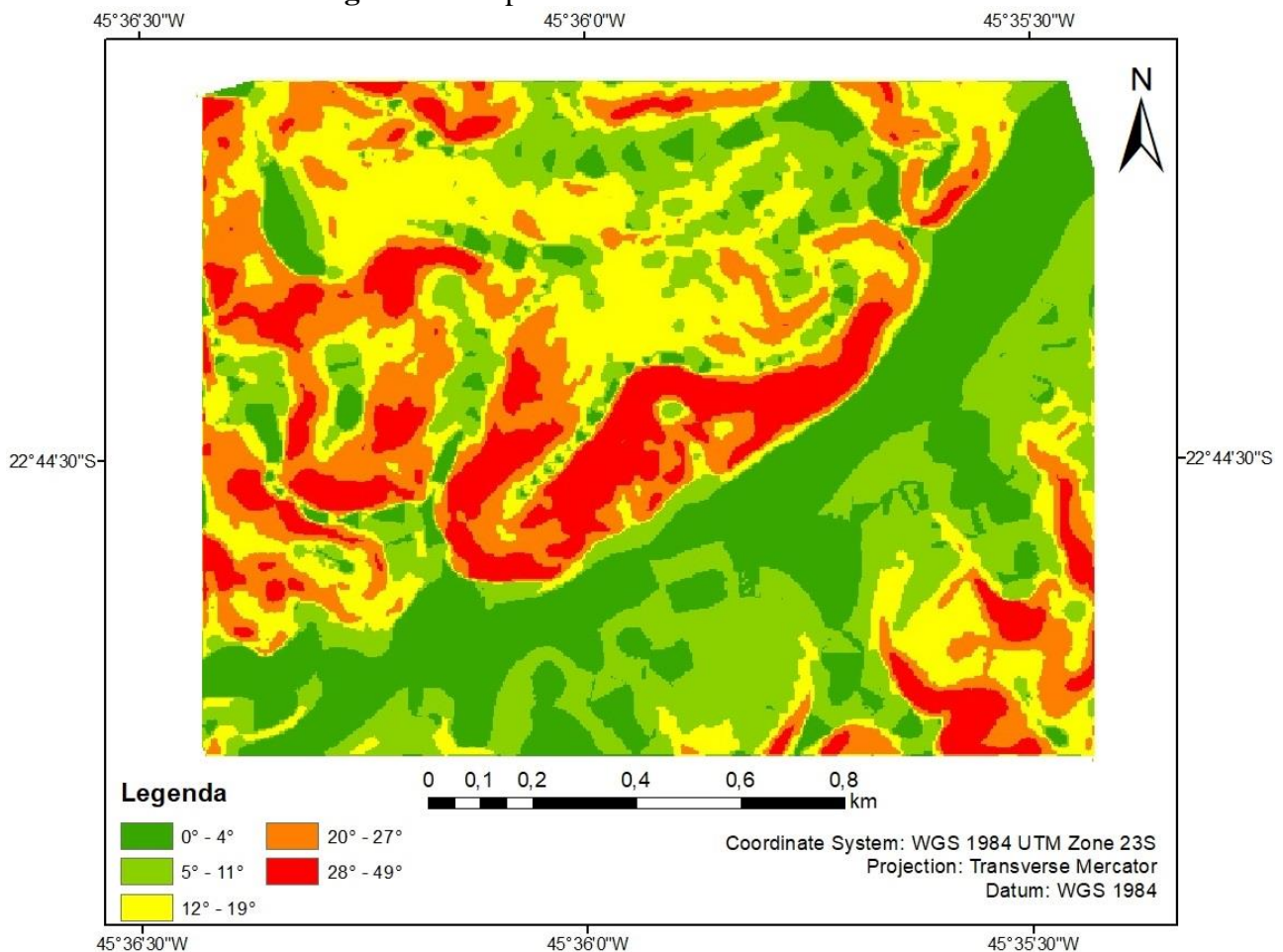
Com relação à ocupação humana, é possível observar que a área em estudo apresenta 2.890 m² de construções composta por ruas, telhados e solo exposto (69,5% da área total). Este pode ser um fator importante a ser considerado na análise de áreas de risco. Afinal, tais intervenções humanas tendem a agir como fatores indutores importantes para a deflagração dos deslizamentos, na forma de concentração de águas pluviais, vazamentos pontuais, cortes e aterros, etc. Além disso, nestas circunstâncias, os prejuízos econômicos e sociais tendem a ser mais elevados. Isto, pois o

volume de material deslocado encosta abaixo será uma somatória das porções de solo que sofreram ruptura, com o material proveniente das construções humanas.

Ressalta-se também que muitas dessas construções identificadas nas imagens, estão em áreas de alta declividade, foram construídas em regiões irregulares e apresentam baixo padrão construtivo. Estes são elementos importantes a serem considerados, pois a declividade acentuada já é um fator preponderante para a ocorrência de deslizamentos. Outros fatores condicionantes são os cortes verticais de encosta feitos pelos próprios moradores e sem qualquer aval técnico (engenheiros, geólogos, etc.), a retirada da vegetação natural e o acúmulo de lixo nas encostas. Diante de tantos fatores indutores antrópicos, o terreno pode vir a apresentar certa fragilidade, e com a ação das chuvas e conseqüente saturação dos solos, os deslizamentos são comuns.

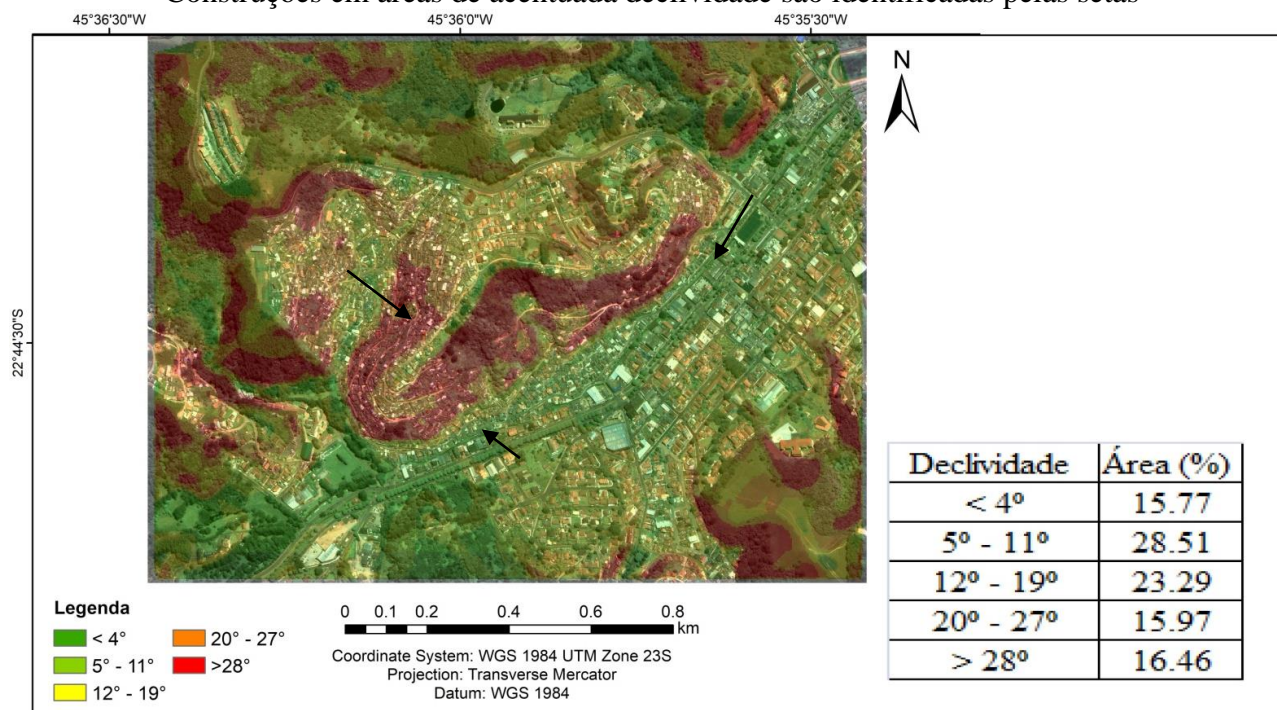
Após a realização da classificação da imagem do sensor *WorldView 2*, realizou-se a etapa de identificação das áreas de instabilidade de encosta, utilizando o modelo *Shalstab*. Conforme descrito anteriormente, o modelo digital de elevação (MDE) é um dos dados de entrada para a execução do modelo matemático. A Figura 5 apresenta o mapa de declividade das áreas em estudo, elaborado através do software *ArcGIS®*. A Figura 6 apresenta a sobreposição do mapa de declividade com a imagem do sensor *WorldView 2*, a fim de facilitar a identificação visual das construções localizadas nas áreas de maior declividade.

Figura 5 – Mapa de declividade do bairro Britador



Fonte: Elaborado pela autora (2017).

Figura 6 – Sobreposição da imagem *WorldView 2* com o mapa de declividade no bairro Britador. Construções em áreas de acentuada declividade são identificadas pelas setas



Fonte: Elaborado pela autora (2017).

A partir da análise do modelo digital de elevação, observa-se que há áreas com declividades superiores à 28°. Ou seja, trata-se de locais com alta probabilidade de ocorrência de deslizamentos, portanto consideradas como inapropriadas para a construção de habitações, tanto no meio urbano quanto no rural (AHRENDT, 2005; PRIETO *et al.*, 2017). Na Figura 6, indicado pelas setas, observa-se a presença de construções nas áreas com declividades superiores a 20°, sendo que estas representam 32,43% do bairro Britador.

Na sequência, o MDE é inserido no *Shalstab*, juntamente com os parâmetros geotécnicos (ângulo de atrito, densidade do solo, coesão e profundidade). O modelo matemático apresenta como resultado mapas que identificam as áreas com maior susceptibilidade à ocorrência de deslizamentos.

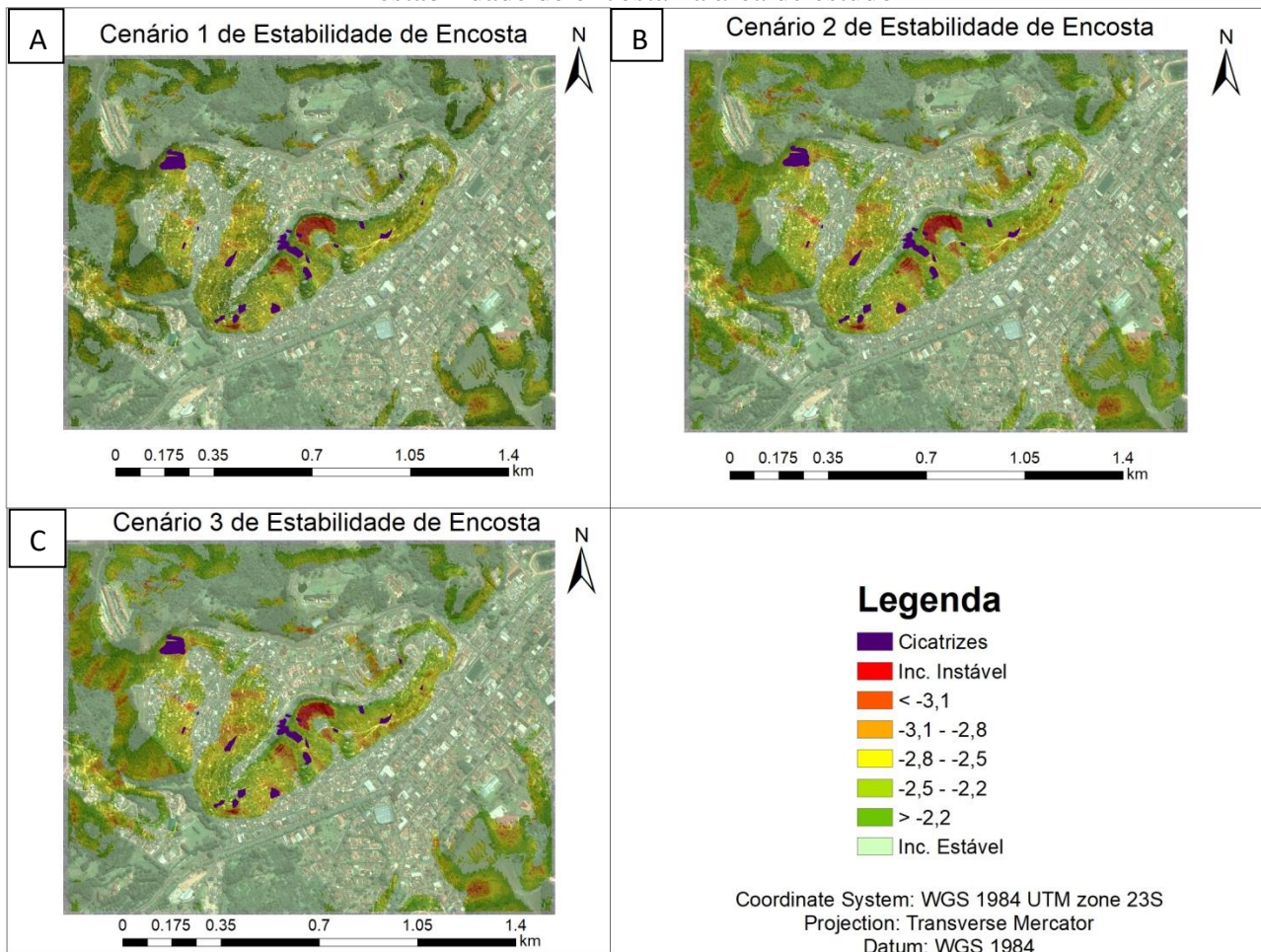
Os parâmetros geotécnicos adotados no modelo *Shalstab*, conforme cenários apresentados na Tabela 4, foram extraídos de trabalhos efetuados na área de estudo (AHRENDT, 2005; MENDES; VALERIO-FILHO, 2015; PRIETO *et al.*, 2017; MENDES *et al.*, 2018a; 2018b), levando-se em consideração a representatividade e variabilidade geológica na área de estudo. As cicatrizes de deslizamento foram mapeadas a partir da imagem do sensor IKONOS, datada de abril de 2000, dois meses após a ocorrência dos principais deslizamentos no município em estudo. A Figura 7 apresenta os resultados obtidos pelo modelo matemático, considerando os três cenários (Tabela 5).

Tabela 5 – Cenários *Shalstab*

Cenários	Ângulo de atrito interno	Densidade do Solo	Profundidade do Solo	Coesão
1	30°	1600 kg/m ³	0.5m	1000 N/m ²
2	33°	1600 kg/m ³	1.0m	1500 N/m ²
3	35°	1600 kg/m ³	1.5m	2000N/m ²

Fonte: Elaborado pela autora (2017).

Figura 7 – Resultado do modelo *Shalstab* considerando os cenários 1 (A), 2 (B) e 3 (C) de estabilidade de encosta na área de estudo



Fonte: Elaborado pela autora (2017).

A partir da análise conjunta das classes de instabilidade e cicatrizes de deslizamentos mapeadas (Figura 7 e Tabela 6), observa-se que o modelo *Shalstab* foi capaz de identificar satisfatoriamente as áreas com maior suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos em encostas urbanizadas. Na Tabela 6 observa-se que 85% das cicatrizes de deslizamento mapeadas estão situadas em classes de maior instabilidade (*destacadas em vermelho*) identificadas pelo modelo *Shalstab*.

Tabela 6 – Distribuição das cicatrizes de deslizamento por classes do *Shalstab* para cada cenário

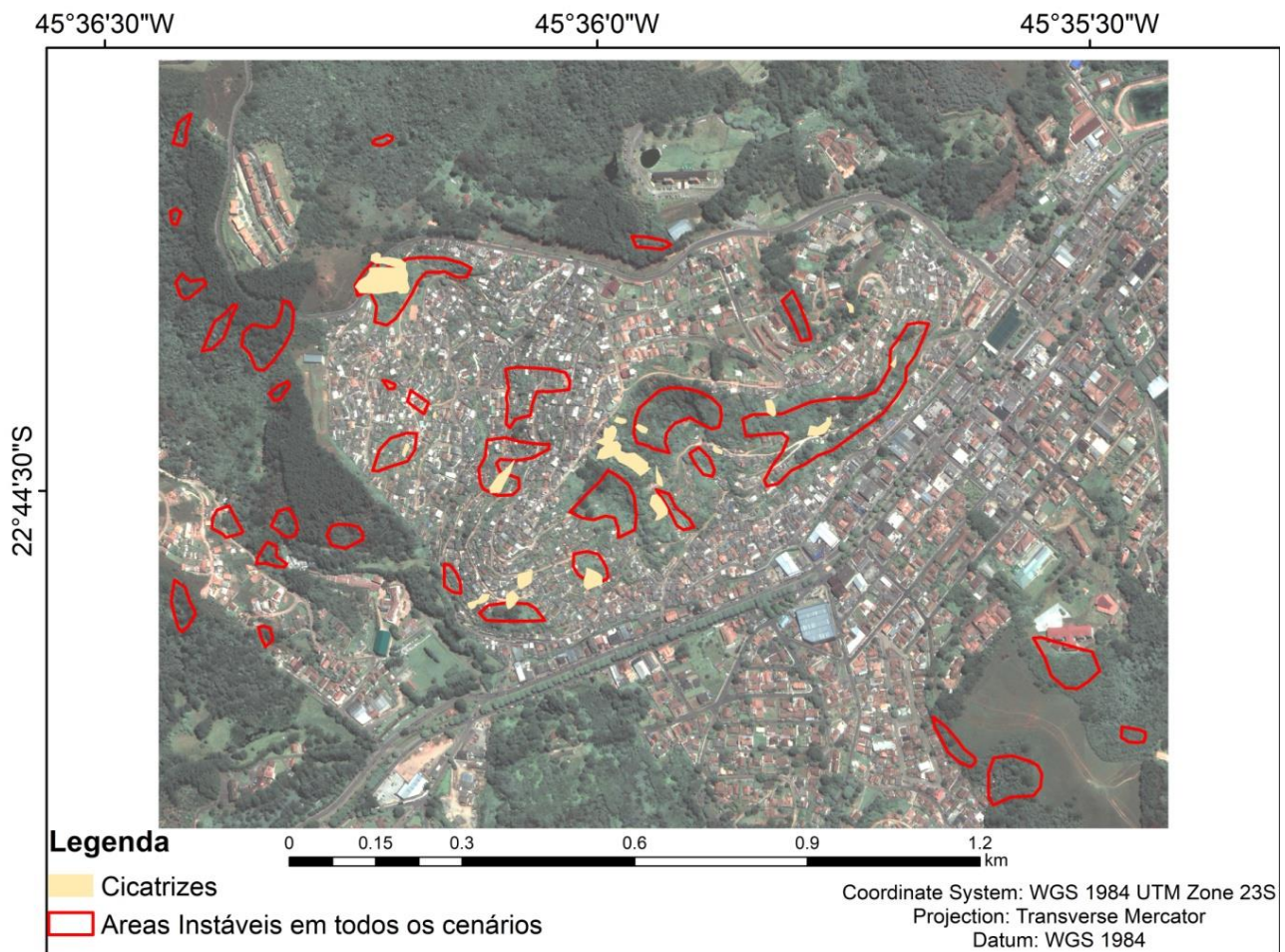
Cenário 1		Cenário 2		Cenário 3	
Classes	% de Cicatrizes	Classes	% de Cicatrizes	Classes	% de Cicatrizes
Inc. Instável	1%	Inc. Instável	1%	Inc. Instável	1%
< -3,1	39%	< -3,1	37,50%	< -3,1	37%
-3,1 - -2,8	37,50%	-3,1 - -2,8	33,75%	-3,1 - -2,8	47%
-2,8 - -2,5	11,00%	-2,8 - -2,5	17,75%	-2,8 - -2,5	12%
-2,5 - -2,2	2,00%	-2,5 - -2,2	2,00%	-2,5 - -2,2	0%
> 2,2	6%	> 2,2	8%	> 2,2	3%
Inc. Estável	3%	Inc. Estável	0%	Inc. Estável	0%

Fonte: Elaborado pela autora (2017).

As áreas de maior instabilidade indicadas pelo modelo *Shalstab* corroboram com aquelas de maior declividade, visualizadas no modelo digital de elevação. Além desses fatores, precisam ser consideradas ainda as alterações antrópicas, tais como: construções com baixo padrão construtivo, retirada da vegetação natural, ausência de pavimentações adequadas, deficiência no sistema de drenagem pluvial, entre outros (PRIETO *et al.*, 2017; MENDES *et al.* 2018a; 2018b). Pois há áreas consideradas pelo modelo com baixa suscetibilidade a escorregamentos, que apresentam cicatrizes de deslizamento, conforme vemos na Tabela 6.

A Figura 8 apresenta as áreas com maior suscetibilidade a escorregamentos para a população residente nas regiões classificadas como Incondicionalmente Instáveis e que merecem maior atenção dos órgãos públicos e defesa civil, a fim de evitar fatalidades.

Figura 8 – Identificação das áreas com maior suscetibilidade a escorregamentos



Fonte: Elaborado pela autora (2017).

A partir da análise da Figura 8 e da classificação da imagem do sensor *WorldView 2*, apresentado na Figura 4, é possível identificar, nas áreas onde há cicatrizes de deslizamentos, elementos relacionados à ocupação antrópica.

Observa-se que há uma predominância de construções muito próximas umas das outras, a maioria apresenta telhados de concreto. Visualmente não se identifica nenhum tipo de loteamento ou divisão dos terrenos, permitindo inferir que as casas foram construídas nos espaços disponíveis, aglomerando-se. Há pouca presença de vegetação arbórea, predominando a vegetação rasteira. As ruas são sinuosas e muitas não apresentam pavimentação. A visita ao campo permitiu a identificação de outros aspectos, como a precariedade das construções, a degradação ambiental, a

falta de coleta de lixo em muitos pontos do bairro, encanamentos expostos e vazamentos de esgoto, além de inúmeros taludes de cortes e aterro.

Mas ressalta-se que existem cicatrizes de deslizamentos em áreas classificadas pelo modelo como de maior estabilidade (classes de -2,5 até Inc. Estável), conforme Tabela 6. Isso corrobora com o pressuposto de que a ação antrópica tem grande papel condicionante e de indução dos deslizamentos. Analisando as Figuras 4 e 8, constata-se que as áreas que apresentaram ocorrências de deslizamentos, possuem baixa cobertura vegetal do tipo rasteira e não há presença de vegetação arbórea, as construções estão muito próximas umas das outras, sendo sua maioria com cobertura de telhados de concreto (classificado como “outros telhados”) e as ruas próximas não apresentam pavimentação. É passível de assumir, em decorrência da visita a campo realizada, que a coleta de esgoto, lixo e de drenagem urbana também são precárias nessas áreas. Tais constatações somadas aos cortes verticais feitos ao longo da encosta para a construção das casas, assim como o lixo acumulado e entulho proveniente das construções, aumentam a sobrecarga no terreno, favorecendo a ocorrência de deslizamentos, mesmo nas áreas de baixa suscetibilidade classificadas pelo *Shalstab*.

A ação antrópica tem papel condicionante na deflagração dos deslizamentos, pois todos os aspectos acima mencionados acabam alterando os parâmetros físicos do solo, fragilizando-o. A ação das chuvas e consequente saturação do solo torna-se o elemento deflagrador dos deslizamentos, uma vez que a área já se encontra bastante antropizada. A modelagem feita com o *Shalstab* pode apresentar alguns erros ou divergências durante a validação das classes de estabilidade com o inventário de cicatrizes, devido às alterações nos parâmetros físicos e mecânicos do solo, provenientes da ação antrópica. Pois as influências antrópicas alteram-se muito rapidamente nessas áreas. O crescimento populacional continua aumentando e, conseqüentemente, a expansão urbana.

Cabe, portanto, analisar as áreas que o modelo indica como áreas de alta suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos, mas que não apresentam cicatrizes. Na Figura 8 essas áreas são facilmente identificadas, e encontram-se nas porções não urbanizadas do bairro. Observa-se que há predomínio da cobertura vegetal arbórea, não há nenhum tipo de construção ou vias próximas. Ou seja, os parâmetros físicos e mecânicos do solo dessas áreas, sofreram pouca ou nenhuma alteração. Este é mais um elemento que corrobora com o pressuposto de que as alterações antrópicas são os principais condicionantes à ocorrência de deslizamentos.

O modelo *Shalstab* tem sido utilizado em diversos estudos de análise de estabilidade de encosta conforme vemos em Michel, Kobiyama, Goerl (2012), Reginatto et al. (2012), Vieira e Ramos (2015), Prieto et al. (2017) e König et al. (2019), e seus resultados têm sido satisfatórios. Os registros de ocorrências de deslizamentos validam o modelo, uma vez que estão corroborando com as áreas identificadas pelo *Shalstab* como de maior suscetibilidade. Os estudos mencionados foram em diferentes regiões montanhosas, sendo dois na serra da Mantiqueira (PRIETO et al., 2017; KÖNIG et al., 2019), um na serra do Mar (VIEIRA; RAMOS, 2015), e dois em Santa Catarina, sendo um na região do vale do Itajaí - SC (MICHEL; KOBİYAMA; GOERL, 2012) e um na bacia do rio Cedros (REGINATTO et al., 2012). Ou seja, todos os estudos utilizando o *Shalstab* ocorreram em áreas com características geotécnicas diferentes, porém apresentam alta declividade e recorrência de deslizamentos translacionais rasos.

Entretanto, cabe ressaltar que o modelo apresenta algumas limitações. Primeiramente, os cálculos para a identificação das áreas instáveis consideram apenas os parâmetros físicos do solo, como coesão, ângulo de atrito, declividade, etc. E muitas dessas áreas suscetíveis a deslizamentos, encontram-se ocupadas. A ação antrópica e suas influências nas propriedades geotécnicas do solo não são aplicadas pelo *Shalstab*. E conforme visto nos estudos de König et al. (2019) e de Mendes et al. (2018a; 2018b), as ações antrópicas podem favorecer o desencadeamento da ruptura do solo e deslizamento de terra. Outro aspecto importante a ser mencionado sobre o *Shalstab*, é que o mesmo não considera a heterogeneidade da área de estudo e, portanto, para uma análise mais detalhada de

áreas heterogêneas, torna-se necessário dividir a área de estudo de acordo com similaridade geotécnica do solo.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo teve por objetivo identificar as áreas mais suscetíveis à ocorrência de deslizamentos de terra no bairro Britador, a partir dos resultados obtidos com o modelo matemático *Shalstab* e as imagens de satélite do sensor orbital *WorldView 2*.

O modelo matemático *Shalstab* se mostrou eficaz para a identificação das áreas de maior suscetibilidade a ocorrência de deslizamentos em encostas urbanas, pois os resultados corroboram com a maior parte das cicatrizes de deslizamentos mapeadas, e também com as áreas de maior declividade. Algumas áreas classificadas pelo modelo como baixa suscetibilidade a escorregamentos, mas que apresentam cicatrizes, se justifica pela intensa ocupação antrópica e degradação ambiental consequente desta, que alteram os parâmetros físicos e mecânicos do solo.

A classificação da imagem do sensor *WorldView 2* permitiu identificar satisfatoriamente os atributos de maior relevância para o estudo preliminar de indução antrópica dos deslizamentos, conhecendo-se o estágio atual de uso e ocupação da área estudada. Desta forma, os resultados da classificação de imagens sugerem que o bairro Britador é intensamente ocupado (2890m² de área construída) e que, conseqüentemente, apresenta um cenário extremamente favorável para a ocorrência de deslizamentos induzidos por captação/condução inadequada de águas pluviais, lançamento de água servida ou precariedade na rede de esgotos e de abastecimento de água potável. Ou seja, a ação antrópica tem fundamental relevância como fator condicionante que leva a deslizamentos. Diante disso, recomenda-se que as áreas indicadas pelo *Shalstab* como de alta suscetibilidade, mas que não apresentaram cicatrizes de deslizamento, ou seja, aquelas com predomínio de cobertura arbórea e sem ocupação humana sejam preservadas, não permitindo a ocupação humana de nenhuma forma.

Ressalta-se a importância do monitoramento das encostas e alerta por parte de órgãos públicos, como defesa civil, além da conscientização da população sobre os riscos de se morar em áreas com alta suscetibilidade a ocorrência de deslizamentos. A existência de leis (e o cumprimento destas) que impossibilitem que tais áreas sejam habitadas é de extrema importância. Entretanto, cabe também aos órgãos administrativos, prover habitações em locais apropriados para a população que costuma residir nessas áreas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHRENDT, A. **Movimentos de Massa Gravitacionais – Proposta de um Sistema de Previsão:** Aplicação na Área Urbana de Campos do Jordão – SP. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

CENAD - CENTRO NACIONAL DE GERENCIAMENTO DE RISCOS E DESASTRES. **Anuário Brasileiro de Desastres Naturais:** 2012. Brasília: CENAD, 2013.

CRUDEN, D. M.; VARNES, D. J. Landslides types and processes. *In:* TURNER A. K.; SCHUSTER, R. L. (Ed.). **Landslides:** investigation and Mitigation. Washington. Washington, D.C.: Transportation Research Board Business Office, 1996. p. 36-75.

DIETRICH, W. E.; MONTGOMERY, D. R. **SHALSTAB:** a digital terrain model for mapping shallow landslide potential. Berkeley: University of California, 1998.

HIRUMA, S. T.; RICCOMINI, C.; MODENESI-GAUTTIERI, M. C., Neotectônica no planalto de Campos do Jordão. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v.31, p. 375-384, 2001.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Banco de dados – SIDRA**. Disponibiliza acesso aos dados de diversas pesquisas realizadas pelo IBGE, como: Censo Demográfico, Censo Agropecuário, Pesquisa Nacional de Saneamento Básico, etc. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 01 fev. 2017.

GALLO-JUNIOR, H.; OLIVATO, D.; CARVALHO, J. L. Sobreposição de Territórios e Gestão de Unidades de Conservação de Proteção Integral: Estudo Aplicado ao Município de Campos do Jordão. *In: Encontro Nacional de Geógrafos*, 16., 2010. **Anais [...]**. Porto Alegre: UFRGS, jul. 2010. Não paginado.

LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. **Biometrics**, Washington, D.C., v. 33, n. 1, p. 159-174, 1977.

MENDES, R. M.; VALERIO-FILHO, M. Real-Time Monitoring of Climatic and Geotechnical Variables during Landslides on the Slopes of Serra do Mar and Serra da Mantiqueira (São Paulo state – Brazil). **Engineering**, Bangkok, v.7, p. 140-159, 2015.

MENDES, R. M.; ANDRADE, M. R. M.; TOMASELLA, J.; MORAES, M. A. E.; SCOFIELD, G. B. Understanding Shallow Landslides in Campos do Jordão municipality – Brazil: disentangling the anthropic effects from natural causes in the disaster of 2000. **Natural Hazards and Earth System Science**, Lund, v. 18, p. 15-30, jan. 2018.

MENDES, R. M.; ANDRADE, M. R. M.; GRAMINHA, C. A.; PRIETO, C. C.; ÁVILA, F. F.; CAMARINHA, P. I. M. Stability Analysis on Urban Slopes: Case Study of an Anthropogenic-Induced Landslide in São José dos Campos, Brazil. **Geotechnical and Geological Engineering**, Basel, v. 36, n.1, fev. 2018.

MICHEL, G. P.; KOBIYAMA, M.; GOERL, R. F. Análise Comparativa entre os Modelos *SHALSTAB* e *SINMAP* na Identificação de Áreas Susceptíveis a Escorregamentos Translacionais. *In: Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos*, 10., 2012. **Anais [...]**. Foz do Iguaçu: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), dez. 2012.

MICHEL, G. P.; KOBIYAMA, M.; GOERL, R. F. Comparative analysis of *SHALSTAB* and *SINMAP* for landslide susceptibility mapping in the Cunha River basin, southern Brazil. **Journal of Soils and Sediments**, Basel, v.14, n. 7, p. 1266-1277, 2014.

MODENESI-GAUTTIERI, M. C.; HIRUMA, S. T. A Expansão Urbana no Planalto de Campos do Jordão: Diagnóstico Geomorfológico para Fins de Planejamento. **Revista do Instituto Geológico**, São Paulo, v. 25, p. 1-28, 2004.

NETO, L. A.; BRÁULIO, N.; SALLES, T.; MOURA, G.; ALMEIDA, C.; KOIKE, K. (Coord.). **Plano Municipal de Redução de Risco**. Brasília: Ministério das Cidades, 2006.

O'LOUGHLIN, G. H. Prediction of Surface Saturation Zones in Natural Catchments by Topographic Analysis. **Water Resource Research**, Hoboken, v. 22, n. 5, p. 794-804, 1986.

PINHO, C. M. D.; FONSECA, L. M. G.; KORTING, T. S.; ALMEIDA, C. M. A.; KUX, H. J. H. Land-cover classification of an intra-urban environment using high-resolution images and object-based image analysis. **International Journal of Remote Sensing**, Washington, D.C., v. 33, n. 19, p. 5973-5995, 2012.

PRIETO, C. C.; MENDES, R. M.; SIMÕES, S. J. C.; NOBRE, C. A. Comparação entre a aplicação do modelo Shalstab com mapas de suscetibilidade e risco de deslizamento na bacia do córrego Piracuama em Campos do Jordão-SP. **Revista Brasileira de Cartografia**, Uberlândia, v. 1, n. 69, p. 71-87, 2017.

REGINATTO, G. M. P.; MACCARINI, M.; KOBİYAMA, M.; HIGASHI, R. A. R.; GRANDO, A.; CORSEUIL, C. W.; CARAMEZ, M. L. *SHALSTAB* Application to Identify the Susceptible Areas of Shallow Landslides in Cunha River Watershed. *In: Proceedings of the GEOBIA*, 4., 2012. **Anais [...]**. São José dos Campos: INPE, 2012. p. 108-130.

VALERIANO, M. M. **Modelo digital de variáveis morfométricas com dados SRTM para o território nacional: o projeto TOPODATA.** *In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 12., 2005. **Anais [...]**. Goiânia: INPE, 2005. p. 1-8.

VARGAS, M.; PICHLER, E. **Residual soil and rock slides in Santos (Brazil).** *In: International Conference for Soil Mechanics and Found Eng*, 4., 1957. **Anais [...]**. Londres, [s.l.], v. 2, 1957. p. 394-398.

VIEIRA, B. C.; RAMOS, H. Aplicação do Modelo SHASLTAB para Mapeamento da Susceptibilidade a Escorregamentos Rasos em Caraguatatuba, Serra do Mar (SP). **Revista do Departamento de Geografia – USP**, São Paulo, v. 29, p. 161-174, 2015.

ZÊRERE, J. L.; TRIGO, R. M.; TRIGO, I. F. Shallow and Deep Landslides induced by rainfall in the Lisbon region (Portugal): assessment of relationships with the North Atlantic Oscillation. **Natural Hazards and Earth System Science**, Lund, v. 5, p. 332-344, 2005.

Data de submissão: 02.05.2018

Data de aceite: 22.01.2020

License information: This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.