



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/03.27.18.54-TDI

**IDENTIFICAÇÃO E ANÁLISE DE ÁREAS DE
SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS DE
ENCOSTAS EM CAMPOS DO JORDÃO-SP
UTILIZANDO O MODELO SHALSTAB E IMAGENS DO
WORLDVIEW-2**

Tèhrrrie Caroline König Ferraz Pacheco

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Sensoriamento, orientada pelos
Drs. Hermann Johann Heinrich
Kux, e Rodolfo Moreda Mendes,
aprovada em 21 de março de 2018.

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3QQ9PH2>

INPE
São José dos Campos
2018

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Gabinete do Diretor (GBDIR)
Serviço de Informação e Documentação (SESID)
Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970
São José dos Campos - SP - Brasil
Tel.:(012) 3208-6923/6921
E-mail: pubtc@inpe.br

**COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO
DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):****Presidente:**

Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação (CPG)

Membros:

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (COCST)
Dr. André de Castro Milone - Coordenação-Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CGCEA)
Dra. Carina de Barros Melo - Coordenação de Laboratórios Associados (COCTE)
Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia e Tecnologia Espacial (CGETE)
Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação-Geral de Observação da Terra (CGOBT)
Dr. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CGCPT)
Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon
Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Duca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SESID)
André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/03.27.18.54-TDI

**IDENTIFICAÇÃO E ANÁLISE DE ÁREAS DE
SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS DE
ENCOSTAS EM CAMPOS DO JORDÃO-SP
UTILIZANDO O MODELO SHALSTAB E IMAGENS DO
WORLDVIEW-2**

Tèhrrrie Caroline König Ferraz Pacheco

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Sensoriamento, orientada pelos
Drs. Hermann Johann Heinrich
Kux, e Rodolfo Moreda Mendes,
aprovada em 21 de março de 2018.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3QQ9PH2>>

INPE
São José dos Campos
2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Pacheco, Tehrrie Caroline König.

P115i Identificação e análise de áreas de suscetibilidade a deslizamentos de encostas em Campos do Jordão-SP utilizando o modelo Shalstab e imagens do WorldView-2 / Tehrrie Caroline König Ferraz Pacheco. – São José dos Campos : INPE, 2018.
xx + 73 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/03.27.18.54-TDI)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2018.

Orientadores : Drs. Hermann Johann Heinrich Kux, e Rodolfo Moreda Mendes.

1. Desastres naturais. 2. Escorregamentos. 3. Mineração de dados. 4. Suscetibilidade a Deslizamentos. 5. Shalstab. 6. WorldView-2. I.Título.

CDU 504.4:528.8



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aluno (a): **Têhrie Caroline König Ferraz Pacheco**

Título: "IDENTIFICAÇÃO E ANÁLISE DE ÁREAS DE SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS DE ENCOSTAS EM CAMPOS DO JORDÃO-SP UTILIZANDO O MODELO SHALSTAB E IMAGENS DO WORLDVIEW-2".

Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Mestre** em

Sensoriamento Remoto

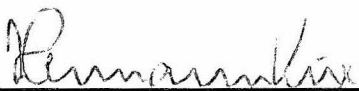
Dra. Claudia Maria de Almeida



Presidente / INPE / SJCampos - SP

() Participação por Video - Conferência

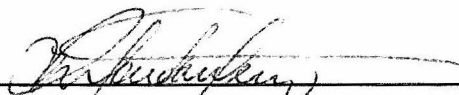
Dr. Hermann Johann Heinrich Kux



Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

() Participação por Video - Conferência

Dr. Rodolfo Moreda Mendes



Orientador(a) / CEMADEN / São José dos Campos - SP

() Participação por Video - Conferência

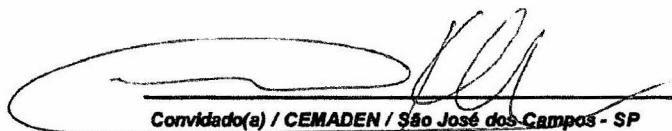
Dr. Thales Sehn Körting



Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

() Participação por Video - Conferência

Dr. Márcio Andrade



Convidado(a) / CEMADEN / São José dos Campos - SP

() Participação por Video - Conferência

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

(x) unanimidade

São José dos Campos, 21 de março de 2018

"If you care about something, you fight for it".

Hergé (1907-1983)

Aos meus queridos pais, meus grandes exemplos de vida, que sempre estiveram ao meu lado, em todos os momentos de minha vida. Ao meu namorado, por seu apoio incondicional nessa jornada. E a minha amada Nonô, que me acompanhou durante as inúmeras madrugadas de pesquisa e realização desse trabalho.

AGRADECIMENTOS

A meus amados pais, por todo o amor, apoio, força e incentivo ao longo de toda a minha vida.

Ao meu companheiro e amado Alex, pelo apoio incondicional durante esta jornada, pela amizade, carinho e por sempre acreditar em mim.

Aos meus orientadores Dr. Hermann Kux e Dr. Rodolfo Mendes, pela oportunidade, apoio, orientação, confiança e amizade.

Aos meus avós, por todo o carinho, apoio e abraços apertados.

Aos meus amigos, que mesmo distantes, sempre me apoiaram, me ouviram reclamar e fizeram de tudo para me animar: Victor, Carla e Édino.

À turma da PG-SER 2016, especialmente aos queridos: Maria Paula, Clarissa, Raquel, Renata, Thales, Celso e Alindomar, pelo apoio, pelas risadas e pela amizade.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) do Ministério da Educação (MEC) pela concessão de bolsa de estudos.

À empresa Digital Globe, na pessoa do Sr. Devon Libby, por gentilmente ter cedido as imagens WorldView-2 utilizadas nesta pesquisa.

À empresa Engesat, na pessoa do Sr. Laurent Martin, por gentilmente ter cedido a imagem IKONOS, utilizada nesta pesquisa.

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, decorrentes das chuvas intensas e da ocupação humana em lugares inadequados. 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 tem por objetivo mapear as áreas suscetíveis a deslizamentos nos bairros Vila Albertina e Britador, localizados no município de Campos do Jordão – SP. Para atingir o objetivo proposto, utilizou-se o modelo matemático *Shalstab* (*Shallow Landsliding Stability Model*) para o mapeamento de áreas com ocorrência de escorregamento de encostas. As imagens de alta resolução espacial e temporal do sistema sensor WorldView-2 foram utilizadas para a classificação das áreas em estudo, visando a compreensão do uso e ocupação destes bairros. Técnicas de mineração de dados (*Data Mining*) foram utilizadas como subsídio para a identificação dos atributos mais relevantes para a discriminação dos alvos de interesse. Os resultados mostram o desempenho do modelo matemático utilizado, assim como suas limitações. E a classificação da imagem permitiu a identificação dos fatores antrópicos que contribuem para a deflagração dos deslizamentos.

Palavras chave: Desastres Naturais. Escorregamentos. Mineração de dados. Suscetibilidade. *Shalstab*. WorldView-2.

**IDENTIFICATION AND ANALYSIS OF AREAS WITH LANDSLIDE
SUSCEPTIBILITY IN CAMPOS DO JORDÃO-SP USING *SHALSTAB* MODEL
AND IMAGES OF THE WORLDVIEW-2**

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 of risk areas are extremely important. Therefore, this study aims to identify the landslide-susceptible areas in Vila Albertina and Britador neighborhood, located at Campos do Jordão city in São Paulo state. Using the *Shalstab* mathematical model, which analyzes the slope stability, and satellite images from WorldView-2 sensor with Data Mining Techniques, it was identified the most susceptible areas and the main characteristics of human occupation. To achieve this goal, three scenarios were simulated for each neighborhood, 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 Disaster. Landslide; Susceptibility; *Shalstab*; WorldView-2; Data Mining.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1. Localização da área de Estudo.....	6
Figura 2.2. Localização das áreas teste.....	7
Figura 2.3. Ocupação irregular em áreas de vertente e fundo de vale: bairros Britador e Bela Vista.....	8
Figura 2.4. Exemplo de moradias em áreas de risco - Vila Albertina.....	8
Figura 2.5. Exemplos de moradias em área de risco, bairro Britador.....	9
Figura 2.6. Deslizamento no bairro Britador no ano 2000.....	9
Figura 2.7. Ocupação irregular no Bairro Britador em 2005, na mesma área de ocorrência dos deslizamentos de 2000.....	10
Figura 2.8. Exemplo de encanamento a céu aberto e solo saturado.....	11
Figura 2.9. Exemplo de construção com encanamento a vista.....	11
Figura 2.10. Compartimentação Geomorfológica da Vila Albertina.....	13
Figura 2.11. Unidades de Conservação da Serra da Mantiqueira.....	16
Figura 2.12. Representação dos Deslizamentos Rotacional e Translacional... 20	20
Figura 2.13. Imagem do sensor IKONOS por fusão Gram-Schmidt.....	21
Figura 2.14. Etapas do <i>Knowledge Discovery in Database</i> (KDD).....	23
Figura 3.1. Fluxograma da metodologia utilizada.....	27
Figura 4.1. Recortes das imagens de entrada (A – banda pancromática e B – bandas multiespectrais, composição verdadeira R5G3B4) e C - resultado da fusão.....	30
Figura 4.2. Segmentação da imagem: A - imagem composição verdadeira. B - imagem segmentada.....	32
Figura 4.3. Exemplo de amostras coletadas.....	32
Figura 4.4. Classificação Vila Albertina.....	35
Figura 4.5. Classificação Britador.....	36
Figura 4.6. Mapa de Declividade da Vila Albertina.....	40
Figura 4.7. Mapa de Declividade do Britador.....	40
Figura 4.8. Sobreposição do mapa de declividade com as cenas do WorldView-2 na Vila Albertina.....	41
Figura 4.9. Sobreposição do mapa de declividade com as cenas do WorldView-2 no Britador.....	42
Figura 4.10. Cenários 1 e 2 do Britador.....	44
Figura 4.11. Cenários 1 e 2 Vila Albertina.....	44
Figura 4.12. Cenários 3 e 4 Britador.....	45

Figura 4.13. Cenários 3 e 4 Vila Albertina.....	45
Figura 4.14. Cenários 5 e 6 Britador.	46
Figura 4.15. Cenários 5 e 6 Vila Albertina.....	46
Figura 4.16. Cenários 7 e 8 Britador.	47
Figura 4.17. Cenários 7 e 8 Vila Albertina.....	47
Figura 4.18. Cenários 9 e 10 Britador.	48
Figura 4.19. Cenários 9 e 10 Vila Albertina.....	48
Figura 4.20. Zonas de maior instabilidade de encosta na Vila Albertina.....	55
Figura 4.21. Zonas de maior instabilidade de encosta no bairro Britador.....	55
Figura 4.22. Mapeamento das áreas de maior suscetibilidade à deslizamentos na Vila Albertina.....	56
Figura 4.23. Mapeamento das áreas de maior suscetibilidade à deslizamentos no bairro Britador.	56

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 2.1. Classificação do modelo <i>Shalstab</i>	18
Tabela 2.2. Características técnicas do sistema sensor WorldView-2.....	22
Tabela 4.1. Definição das Classes de Cobertura da Terra.....	33
Tabela 4.2. Matriz de Confusão da Classificação da Vila Albertina.....	35
Tabela 4.3. Matriz de Confusão da Classificação do Britador.	36
Tabela 4.4. Classificação do Índice <i>Kappa</i>	37
Tabela 4.5. Área de cada Classe da Classificação para o Britador.	38
Tabela 4.6. Área de cada Classe de Classificação para a Vila Albertina.	38
Tabela 4.7. Cenários com diferentes valores no <i>Shalstab</i>	43
Tabela 4.8. Áreas de Suscetibilidade no bairro Britador variando o parâmetro de ângulo de atrito interno.....	50
Tabela 4.9. Áreas de Suscetibilidade na Vila Albertina variando o parâmetro de ângulo de atrito interno.	50
Tabela 4.10. Áreas de Suscetibilidade no bairro Britador variando o parâmetro de coesão.....	51
Tabela 4.11. Áreas de Suscetibilidade na Vila Albertina variando o parâmetro de coesão.....	51
Tabela 4.12. Áreas de Suscetibilidade no bairro Britador variando o parâmetro de profundidade do solo.	52
Tabela 4.13. Áreas de Suscetibilidade na Vila Albertina variando o parâmetro de profundidade do solo.	52
Tabela 4.14. Estatísticas de suscetibilidade da Vila Albertina.	53
Tabela 4.15. Estatísticas de suscetibilidade do bairro Britador.	54
Tabela 4.16. Estatística de cicatrizes da Vila Albertina por classe do <i>Shalstab</i>	57
Tabela 4.17. Estatísticas de cicatrizes no bairro Britador por classes do <i>Shalstab</i>	58

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	2
1.1.1 Objetivo Geral	2
1.1.2 Objetivos Específicos	3
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
2.1 Definições	4
2.2 Caracterização Física da Área de Estudo	6
2.3 Expansão Urbana e Áreas de Preservação	15
2.4 Modelo <i>Shalstab</i>	16
2.5 Deslizamentos: Definições e Características	19
2.6 Imagens de Alta Resolução Espacial	20
2.7 Mineração de Dados	23
2.8 Classificação	24
3. MATERIAIS E MÉTODOS	26
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	29
4.1 Fusão das Imagens	29
4.2 Ortorectificação	30
4.3 Segmentação	31
4.4 Seleção de Amostras	32
4.5 Mineração de Dados	34
4.6 Classificação	34
4.7 Modelo Digital de Elevação	39
4.8 Resultados <i>Shalstab</i>	42
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	59
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
APÊNDICE A – Árvore de Decisão gerada pelo algoritmo CART	70

APÊNDICE B – Cenários 1 a 10 agrupados do bairro Vila Albertina.	71
APÊNDICE C – Cenários 1 a 10 agrupados do bairro Britador.....	72
APÊNDICE D – Mapeamento das Áreas de Risco à deslizamentos em Campos do Jordão realizado pelo IG.	73

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 resultar em 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 mais elevados e solos encharcados, podem desencadear deslizamentos, levando a prejuízos econômicos, materiais e até à perda de vidas. Para exemplificar, convém recordar dos deslizamentos de janeiro de 2011 na região serrana do Rio de Janeiro, que deixaram 947 mortos, mais de 300 pessoas desaparecidas e milhares de desabrigados, sendo considerado um dos piores desastres do país (CEMADEN, 2016). Essa tragédia desencadeou ações governamentais que visaram à criação de instituições de pesquisa com foco em estudar, analisar e monitorar áreas de risco.

As técnicas de Sensoriamento Remoto têm mostrado grande eficácia nesses estudos. Imagens de satélites provenientes de sensores orbitais permitem extrair informações referentes ao relevo, áreas de ocupação e expansão urbana, cicatrizes de deslizamentos, tipos 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 estudadas, favorecendo a discriminação entre dois ou mais alvos distintos. As análises temporais de determinados locais mostram as mudanças no uso e cobertura da terra ao longo do tempo, possibilitando uma análise mais detalhada de como foi alterada a suscetibilidade da área.

Devido ao grande volume de dados e informações provenientes de estudos urbanos e da análise de imagens de sensores orbitais de alta resolução espacial, utilizam-se as técnicas da Mineração de dados (do inglês *Data Mining*), a fim de identificar e selecionar quais são os dados mais relevantes para alcançar o objetivo do estudo. Um estudo detalhado sobre Mineração de dados encontra-se em Körting (2012). Tais técnicas também foram utilizadas nos trabalhos de Meneguetti e Kux (2014) e Carvalho (2011), dentre outros. Em estudos referentes a deslizamentos de terra, além da Mineração de dados, pode-se utilizar o modelo matemático *Shalstab*, conforme apresentado por Reginatto et al. (2012), Vieira e Ramos (2015), Prieto et al. (2017).

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 encostas, pois apresenta recorrentes casos de deslizamentos de terra (PRIETO et al. 2017, MENDES et al. 2018a,b). A sua complexidade geomorfológica quando associada com a expansão urbana desordenada, especulação imobiliária e a consequente degradação ambiental, geram a combinação perfeita para a ocorrência de desastres. A escolha desse município para a realização do estudo deve-se, além dos fatores acima mencionados, à disponibilidade de dados de boa qualidade, fornecidos através de uma parceria com o Cemaden (Centro de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais). Espera-se que as técnicas aplicadas apresentem bons resultados e possam ser replicadas em outras áreas de risco, considerando sempre as devidas adaptações ao novo contexto local.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Fazer o mapeamento detalhado de áreas de suscetibilidade a deslizamentos, utilizando o modelo matemático *Shalstab* e imagens de alta resolução espacial do sistema sensor orbital WorldView-2.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Identificar os fatores mais relevantes para o desencadeamento de escorregamentos superficiais rasos.
- Analisar e avaliar o desempenho do modelo *Shalstab* em encostas urbanas, para o mapeamento de áreas com deslizamentos e proposição de sugestões para a adaptação do modelo às condições locais.
- Desenvolvimento de um mapa de suscetibilidade a deslizamentos para a área em estudo.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Definições

Os fenômenos naturais, existentes em todo o nosso planeta Terra, podem acabar em desastres quando há uma relação inadequada entre Homem e Natureza (KOBAYAMA, et al. 2006). Dessa forma, grupos humanos que vivem em áreas suscetíveis a fenômenos naturais, são vulneráveis às suas consequências. Uma comunidade que vive em locais perigosos corre o risco de ter prejuízos tanto financeiros, como materiais e sociais. Diante disso, é importante a definição dos termos desastres, suscetibilidade, vulnerabilidade, perigo e risco.

De acordo com Wisner (2003), os desastres acontecem quando um grupo de pessoas afetadas por um fenômeno natural tem seu estilo de vida interrompido e necessita de auxílios externos (ex. governamentais), para se reerguer.

A suscetibilidade está relacionada a áreas ou construções que enfrentam os eventos naturais. Por exemplo, uma determinada cidade, localizada no sopé de um vulcão ativo, está suscetível a ser devastada por fluxos de lava, caso esse vulcão entre em atividade. O mesmo se aplica para áreas de deslizamento de terras. Enquanto a população que vive nessas áreas, encontra-se vulnerável ao mesmo fenômeno (WISNER, 2003).

A vulnerabilidade ocorre em função da pré-existência de condições tanto materiais como sociais (TOBIN; WHITEFORD, 2012). Seguindo esta lógica, Wisner (2003) afirma que:

Por vulnerabilidade entende-se como sendo as características de uma pessoa ou de grupos de pessoas em determinadas situações que influenciam sua capacidade de antecipar, resistir e se recuperar do impacto de determinado fenômeno natural. Isso envolve a combinação de diversos fatores que determinam o grau em que as vidas, propriedades e outras posses dos grupos afetados são colocadas em risco pelo fenômeno natural (WISNER, 2003, p. 11).

Entretanto, a vulnerabilidade pode variar de acordo com análises de diferentes grupos de pessoas, assim como a sua capacidade de reorganizar a vida após o desastre. Aquelas que possuem condições financeiras mais favoráveis conseguem reconstruir suas casas e suas vidas mais rapidamente do que os menos favorecidos (WISNER, 2003; KAPPES, 2012).

O perigo está relacionado com o tempo de recorrência de eventos naturais, e estes podem afetar diferentes áreas de forma individual ou combinada (um ou mais eventos naturais ocorrendo simultaneamente na mesma área). Em outras palavras, o perigo existe em áreas suscetíveis a determinados eventos naturais, como deslizamentos de terra.

O risco é uma associação do perigo com a vulnerabilidade, ou seja, ele está relacionado com a ocorrência de danos materiais, físicos e perda de vidas (KOBAYAMA et. al. 2006; WISNER, 2003; KAPPES, 2012). Logo, a partir do momento em que pessoas passam a morar e constituir uma sociedade em áreas consideradas perigosas, construindo casas e edificações, essas áreas passam a ser consideradas de risco, pois a manifestação de um evento natural acabaria prejudicando essa sociedade.

O monitoramento e estudo das áreas suscetíveis aos desastres naturais são essenciais, pois “quando não são aplicadas medidas para a redução dos efeitos dos mesmos, a tendência é aumentar a intensidade, a magnitude e a frequência dos impactos” (KOBAYAMA, et. al. 2006, p.1).

Desencadeado por chuvas intensas, um dos principais desastres naturais que afetam a população brasileira são os deslizamentos de terra. Estes podem ocorrer devido à geologia e geomorfologia local, ao tipo de solo e sua cobertura, além da ocupação humana, plantios em locais inadequados, retirada da vegetação natural etc. Tais elementos precisam ser considerados em estudos de áreas de risco (MENDES et al., 2018a,b). O impacto de uma urbanização desordenada, com uso inadequado dos espaços naturais e ocupação de áreas instáveis, deu origem a problemas geoecológicos de consequências catastróficas (MODENESI-GAULTIERI; HIRUMA, 2004, p.3).

2.2 Caracterização Física da Área de Estudo

O município de Campos do Jordão – SP está centrado nas coordenadas geográficas S 22°44'19", W 45°35'32" (Figura 2.1). As áreas teste escolhidas para o desenvolvimento desse trabalho foram os bairros Vila Albertina e Britador, apresentados na Figura 2.2.

Figura 2.1. Localização da área de estudo.

Localização do Município de Campos do Jordão - SP

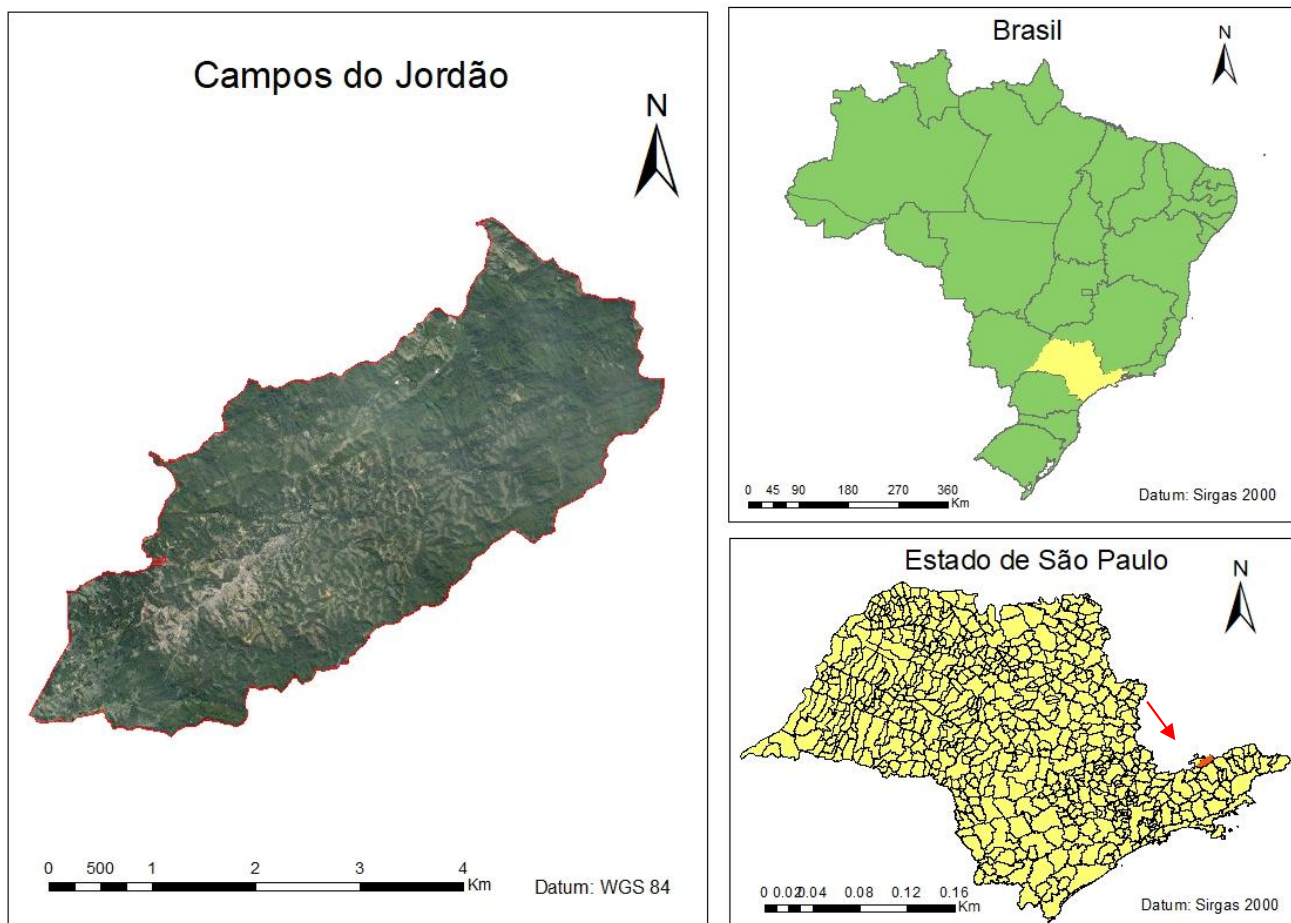
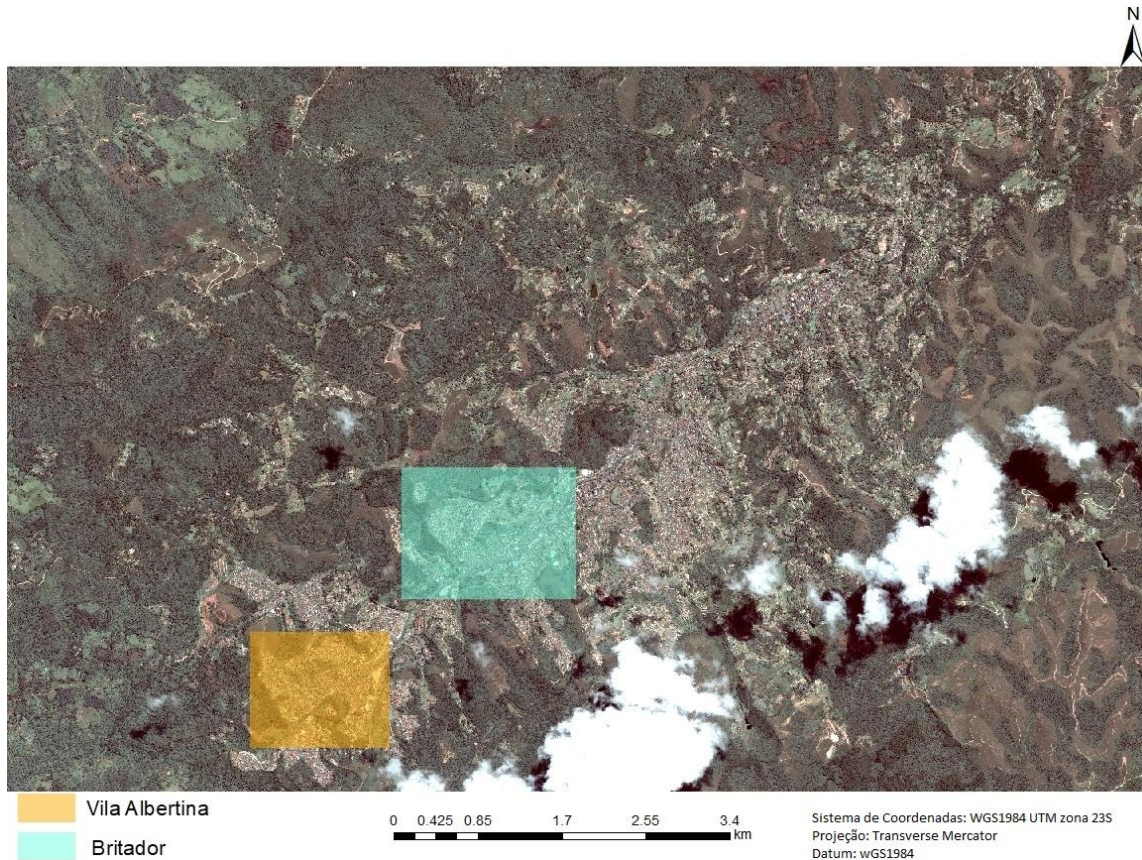


Figura 2.2. Localização das áreas teste.



De acordo com o IBGE (2016) este município conta com 51.157 habitantes e tem uma extensão territorial de 290,520 km². Está localizado no planalto cristalino, com altitudes superiores a 2000 m (MODENESI-GAULTIERI e HIRUMA, 2004). O clima caracteriza-se por temperatura média de 14,3°C, com precipitações anuais variando de 1.205 mm a 2.800 mm (MODENESI-GAULTIERI; HIRUMA, 2004). De acordo com Neto et al. (2006, p.30), “os meses mais chuvosos são Janeiro (321,6 mm), Dezembro (279,5 mm) e Fevereiro (237,9 mm)”. Ao passo que em junho e julho a precipitação média é de 49,9 mm e 37,6 mm respectivamente. A região também apresenta um grande excedente hídrico devido à alta umidade do ar e elevados índices de precipitação, que garantem umidade no solo o ano todo.

Este município apresenta feições geomorfológicas expressivas, com muitas áreas de encostas íngremes. Além disso, os solos são altamente argilosos,

favorecendo o deslizamento de encostas. A ocupação humana em áreas de risco (Figuras 2.3, 2.4, 2.5, 2.6 e 2.7) é mais um elemento agravante e facilitador dos deslizamentos.

Figura 2.3. Ocupação irregular em áreas de vertente e fundo de vale: bairros Britador e Bela Vista.



Fonte: Ahrendt, (2005).

Figura 2.4. Exemplo de moradias em áreas de risco - Vila Albertina.



Figura 2.5. Exemplos de moradias em área de risco, bairro Britador.



Fonte: Ahrendt (2005).

Figura 2.6. Deslizamento no bairro Britador no ano 2000.



Fonte: Neto et al. (2006).

Figura 2.7. Ocupação irregular no Bairro Britador em 2005, na mesma área de ocorrência dos deslizamentos de 2000.



Fonte: Neto et al. (2006).

Além da ocupação irregular, outros problemas antrópicos que favorecem os movimentos de massa, são os encanamentos expostos ao tempo. Devido às chuvas, vento e amplitude térmica, os encanamentos, normalmente feitos de PVC, podem apresentar rachaduras e conseqüentemente vazamentos. Esses vazamentos acabam por encharcar o solo, favorecendo no desencadeamento de deslizamentos (MENDES et al., 2018a,b). As Figuras 2.8 e 2.9 exemplificam o problema dos solos encharcados por vazamentos de água. Outros fatores antrópicos que também precisam ser considerados são os cortes verticais feitos nas encostas e a sobrecarga de peso nas áreas próximas aos taludes de corte (AHRENT, 2005; MENDES et al. 2018^a, b). Tais procedimentos, normalmente realizados pelos próprios moradores e sem qualquer planejamento ou análise técnica (geólogos, engenheiros), acabam por desestabilizar o solo, favorecendo a sua ruptura.

Figura 2.8. Exemplo de encanamento a céu aberto e solo saturado.



Figura 2.9. Exemplo de construção com encanamento à vista.



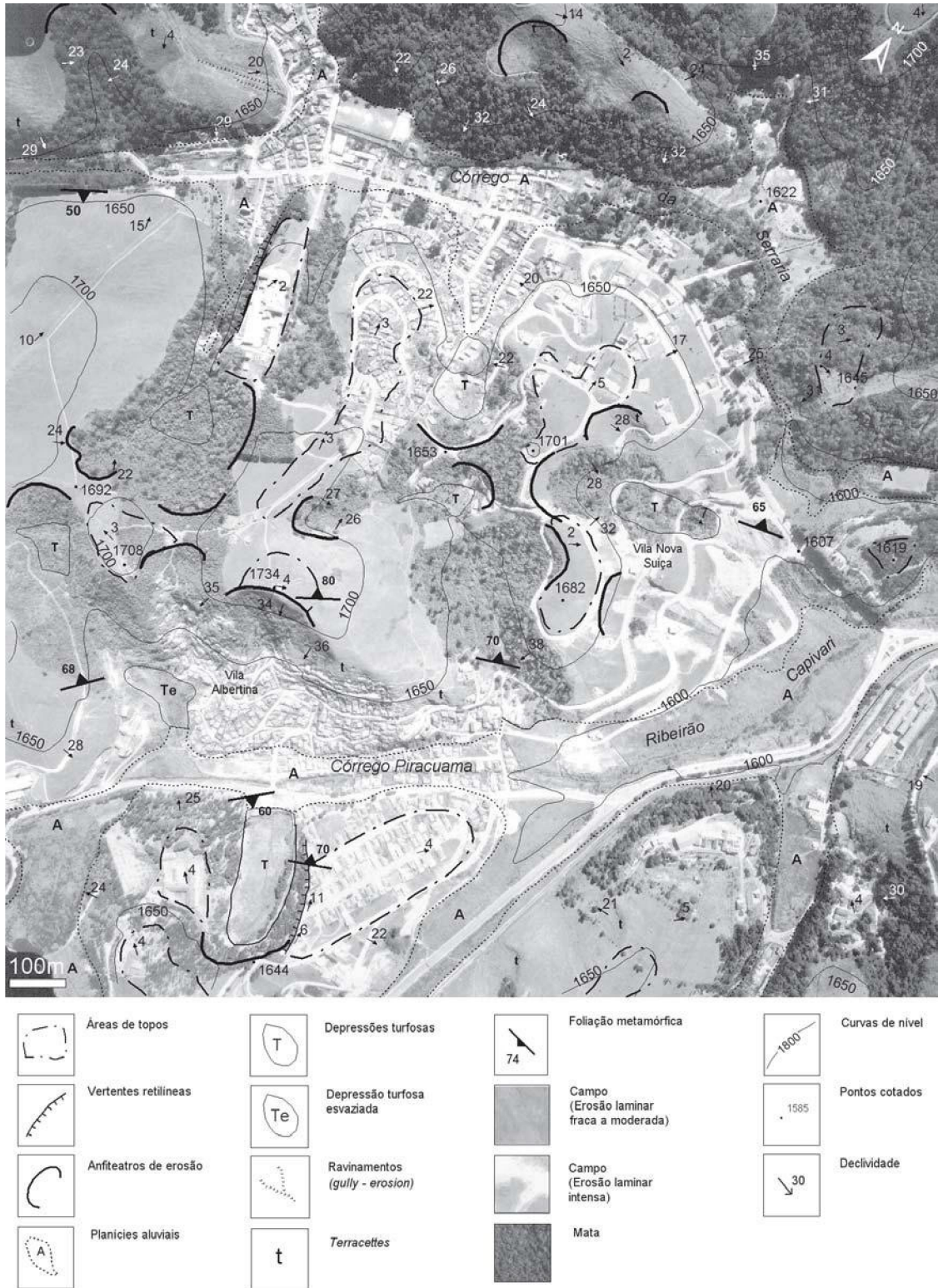
De acordo com Modenesi–Gauttieri e Hiruma (2004), o planalto de Campos do Jordão localiza-se em um afloramento cristalino da Província Mantiqueira, delimitado por duas falhas transcorrentes: a falha Jandiuvira e a Falha São

Bento do Sapucaí (HIRUMA et. al., 2001). Na região há predomínio de rochas como gnaisses, granitos, xistos, quartzitos, entre outros. Estudos mostram tectonismo recente nessas falhas, que podem estar associados com a deflagração de processos erosivos e movimentos de massa (HIRUMA, 1999; MODENESI, et al. 2002).

Outro elemento do relevo que precisa ser considerado é a diferença da posição das vertentes em relação ao sol: enquanto aquelas que recebem energia solar mais intensa são secas, as outras apresentam maior teor de umidade, havendo maior propensão à erosão. Em seus estudos, Modenesi-Gauttieri e Hiruma, (2004) realizaram uma compartimentação geomorfológica da área e geraram um diagnóstico dessas unidades, associando os fatores geomorfológicos com a expansão urbana. Quanto à geomorfologia, há seis compartimentos, a saber: áreas de topo, lombas, vertentes retilíneas, anfiteatros de erosão, depressões turfosas e planícies alveolares (que incluem várzeas, terraços e rampas de colúvio). A Figura 2.10 apresenta a compartimentação geomorfológica no bairro da Vila Albertina.

As áreas de topo são convexas, com declividades variando de 2° a 5°, sendo que os solos mais comuns são do tipo litossolos revestidos por vegetação de campo. O lençol freático encontra-se a mais de 30m de profundidade. Há escoamento superficial de caráter anastomosado e erosão laminar. As lombas assemelham-se a rampas, com inclinação de aproximadamente 20°. São considerados ambientes mais secos, pois dispersam o escoamento superficial. O lençol freático dessas áreas encontra-se em profundidades superiores a 20m e a cobertura vegetal varia de vegetação de campo a campos sujos. Erosões com características de terraceamento e ravinamento são comuns (MODENESI-GAULTIERI; HIRUMA, 2004).

Figura 2.10. Compartimentação geomorfológica da Vila Albertina.



Fonte: Modenesi-Gauttieri e Hiruma (2004).

As vertentes retilíneas apresentam convexidade pouco acentuada, podendo haver terraceamento em pequenos degraus, além de ravinamento, voçorocas e deslizamentos. Devido a sua inclinação acentuada, os solos dessas áreas são pouco evoluídos (rasos) e, conseqüentemente, a cobertura vegetal é de campos. Já os anfiteatros de erosão originam-se dos movimentos de massas das vertentes, havendo reentrâncias côncavas nas vertentes. São ambientes considerados úmidos devido ao escoamento superficial e subsuperficial. Os solos são mais desenvolvidos e com características mais argilosas, permitindo o desenvolvimento de matas de Araucária, mas também favorecendo os movimentos de massa profundos (MODENESI-GAUTTIERI e HIRUMA, 2004).

As depressões turfosas são depressões mal drenadas, com baixa inclinação. Os solos apresentam altos teores de matéria orgânica e a cobertura vegetal é composta por vegetação herbácea e arbustos adaptados a áreas encharcadas. Além disso, o lençol freático aflora na superfície em épocas de chuva. É uma área favorável a escorregamentos de massa e corrida de lama. As planícies alveolares desenvolvem-se à montante das soleiras rochosas, próximo aos cursos d'água. Devido aos coluvamentos, as feições de terraceamento e várzea ficam suavizadas. Na área, há mata de Araucária e *Podocarpus* (popularmente conhecido como Pinheiro). O solo apresenta características areno-argilosas e argilo-arenosas, e a declividade varia entre 2° e 8° (MODENESI-GAUTTIERI; HIRUMA, 2004).

Os aspectos geológicos e geomorfológicos de Campos do Jordão permitiram que se desenvolvesse uma vegetação tropical de altitude, apresentando tanto vegetações com características de campo, quanto de mata de altitude. Os campos estão presentes nas áreas de topo e vertentes retilíneas, enquanto que as matas são recorrentes nas áreas dos anfiteatros de erosão e o setor retilíneo das vertentes convexas (HIRUMA; RICCOMINI, 1999).

2.3 Expansão Urbana e Áreas de Preservação

A expansão urbana de Campos do Jordão, iniciada na década de 1960 e intensificada nos anos 1970, ocorreu a partir de três núcleos principais, a saber: Abernóssia, Jaguaribe e Capivari. Enquanto inicialmente foram ocupadas áreas com 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 (AHRENDT, 2005, 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).

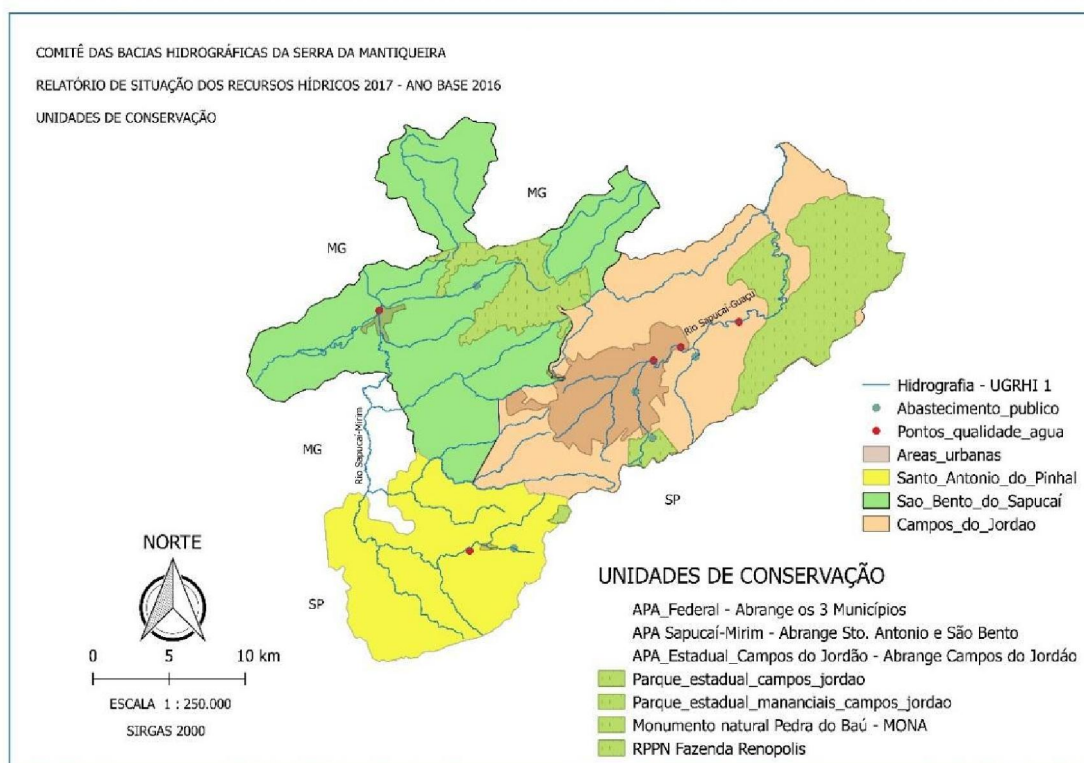
As construções precárias, localizadas em áreas de vertentes mais íngremes, consideradas a priori como zonas ilegais para a construção, acabaram, posteriormente, sendo legalizadas pelo governo. Entretanto, os cortes nas encostas e os aterros, são realizados pelos próprios moradores, sem qualquer planejamento ou infraestrutura adequada. Estes são elementos que agravam o grau de periculosidade da região, deixando seus moradores em risco (AHRENDT, 2005).

Ressalta-se, ainda, que o território de Campos do Jordão só passou a ser considerado como Área de Preservação Ambiental (APA) em 1983, ou seja, duas décadas depois do início da expansão urbana (GALLO-JUNIOR, OLIVATO, CARVALHO, 2010).

Atualmente na região há seis diferentes unidades de conservação, sendo três do tipo Área de Proteção Ambiental (APA), e três parques estaduais. São eles: APA Federal da Serra da Mantiqueira, APA Estadual de Campos do Jordão e APA Municipal de Campos do Jordão, Parque Estadual dos Mananciais, Parque Estadual de Campos do Jordão e Parque Estadual da Represa do Fojo (GALLO-JUNIOR, OLIVATO, CARVALHO, 2010). Além das APAs acima

mencionadas, há também no território, as Áreas de Preservação Permanente (APP), que estão de acordo com os padrões definidos pelo Artigo 4º do novo Código Florestal (BRASIL, 2012). Este define que as áreas de preservação permanente (APP) são áreas protegidas, visando à proteção da biodiversidade, recursos hídricos, fauna e flora local, estabilidade geológica e pedológica. A Figura 2.11 apresenta as unidades de preservação ambiental conforme consta no relatório do Comitê das Bacias Hidrográficas da Serra da Mantiqueira (CBH – SM).

Figura 2.11. Unidades de Conservação da Serra da Mantiqueira.



Fonte: Comitê das Bacias Hidrográficas da Serra da Mantiqueira (2017).

2.4 Modelo *Shalstab*

O *Shalstab* (*Shallow Landsliding Stability Model*) proposto por Dietrich e Montgomery em 1998, é um modelo matemático para a análise de escorregamentos superficiais (MICHEL et. al., 2012). Este utiliza parâmetros

topográficos, hidrológicos e outros relacionados com a física e mecânica do solo, não levando em consideração os fatores antrópicos como condicionantes dos deslizamentos (REGINATTO, et.al. 2012).

O modelo *SHALSTAB* calcula a quantidade de chuva necessária para a deflagração de escorregamentos, considerando o fluxo de subsuperfície paralelo à superfície, a condutividade hidráulica e a espessura do solo uniforme para toda bacia (VIEIRA, RAMOS, 2015, p. 163).

A formulação matemática do modelo *Shalstab* (Eq. 1) é uma associação das fórmulas do modelo de estabilidade de encosta infinita descrito 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	ρ_s = densidade do solo ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
t = transmissividade do solo	ρ_w = densidade da água ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
θ = inclinação ($^\circ$)	g = gravidade ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)
a = área (m^2)	z = espessura do solo (m)
b = comprimento do contorno (m)	φ = ângulo de fricção efetiva do solo ($^\circ$)
c' = coesão efetiva do solo (kPa)	

Para trabalhar com o *Shalstab*, é necessário um Modelo Digital de Terreno (MDT) da área de estudo, assim como dados referentes à coesão, ângulo de atrito interno, densidade do solo e profundidade do solo. O mapeamento das cicatrizes de escorregamento é outra etapa necessária, que auxilia na validação dos resultados (MICHEL et. al., 2012). Para esta tarefa, atualmente utilizam-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 sete classes de valores, conforme apresentado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1. 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 encharcado, os parâmetros físicos conseguem superar a declividade, não ocasionando deslizamentos. As Equações 2 e 3 representam, respectivamente, a formulação matemática das classes Incondicionalmente Instável e Incondicionalmente Estável.

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

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

É importante ressaltar que o modelo não produz bons resultados em áreas que sofreram glaciações, áreas com deslizamentos de terra profundos (ex. rotacionais ou circulares), regiões com afloramentos rochosos ou falésias, e

locais com água subterrânea que pode aflorar na superfície de tempos em tempos (DIETRICH, MONTGOMERY, 1998).

2.5 Deslizamentos: Definições e Características.

Os movimentos de massa são transformações nas superfícies, levando em consideração o deslocamento de solos, detritos e blocos rochosos. Eles 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, não há um consenso acadêmico sobre a classificação dos tipos de movimentos de massa, como se vê nos trabalhos de Cruden e Varnes (1996), Vargas e Pichler (1957), Ahrendt (2005), Prieto et al. (2017).

No Brasil, a classificação oficial definida pelo COBRADE - Classificação e Codificação Brasileira de Desastres (CENADE, 2013) diz que os movimentos de massa são processos geológicos e podem ser divididos em quatro tipos, a saber:

- a) quedas, tombamentos e rolamentos de rochas;
- b) deslizamento de solo ou rocha;
- c) corridas de massa;
- d) subsidência e solapamento.

O presente trabalho utiliza a definição de Cruden e Varnes (1996), que considera que os deslizamentos são 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 alta

compactação e elevado teor de argila (ZÊRERE, et. al., 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 e ocorre com maior frequência em zonas de materiais homogêneos, sendo comum sua ocorrência em áreas de aterro e barragens (AHRENDT, 2005). A Figura 2.12 traz a representação dos dois tipos de deslizamentos.

Figura 2.12. Representação dos Deslizamentos Rotacional e Translacional.



Fonte: Adaptado de Cemaden (2016).

2.6 Imagens de Alta Resolução Espacial

As imagens de alta resolução espacial apresentam uma resolução espectral mais refinada, com maior nível de detalhes, como por exemplo, os sistemas sensores orbitais IKONOS, WorldView-2 e 3, QuickBird, dentre outros. As imagens destes sensores são muito utilizadas em estudos de áreas urbanas, como por exemplo, Pinho et al. (2005), Santos et al., (2011), Meneghetti e Kux (2013). A Figura 2.13 é um exemplo de imagem de alta resolução do sensor IKONOS, da região de Campos do Jordão, obtida em abril de 2000. Essa imagem passou por um pré-processamento, no qual as bandas multiespectrais (R3G2B1) foram fusionadas com a banda pancromática, conforme Pinho et al. (2012).

Figura 2.13. Imagem do sensor IKONOS por fusão Gram-Schmidt.



Fonte: Imagem cedida pela Engesat (2000).

Neste trabalho, utilizou-se uma imagem do sistema sensor WorldView-2. Este sensor orbital está em órbita sol-síncrona, a uma altitude de voo de 770 km. O tempo de revisita a um mesmo ponto na superfície terrestre é de 1 dia, cobrindo uma área de 16,4 km². Possui oito bandas, que compreendem a faixa espectral de 400 nm até 1040 nm e uma banda pancromática (DIGITALGLOBE, 2017). A Tabela 2.2 resume as características técnicas das imagens deste sistema sensor, que foram utilizadas neste projeto.

Tabela 2.2. Características técnicas do sistema sensor WorldView-2.

Bandas	Número de Bandas	Resolução Espacial (m)	Resolução Radiométrica
Multiespectrais	8	2,00 m	11 bits/pixel
Pancromática	1	0,50 m	11 bits/pixel

Fonte: Adaptado de DigitalGlobe, (2017).

Na faixa multiespectral, há 4 bandas básicas que vão do espectro visível ao infravermelho próximo, a saber: azul (450-510 nm), verde (510-580 nm), vermelho (630-690 nm) e infravermelho próximo 1 (770-895 nm). E quatro novas bandas sendo elas: azul costeiro (400-450 nm), amarelo (585-625 nm), vermelho limítrofe (705-745 nm) e infravermelho próximo 2 (860-1040 nm). A resolução espacial destas bandas é de 2,00 m (DIGITALGLOBE, 2017).

A banda pancromática compreende a faixa de 450-800 nm e tem uma resolução espacial de 0,50 m. Entretanto, sua imagem não possui uma resolução espectral tão refinada quanto as bandas multiespectrais, sendo, portanto, frequentemente efetuada a fusão desta banda, com as bandas multiespectrais. Dessa forma, é possível obter uma imagem com as características espectrais provenientes das bandas multiespectrais, associada à melhor resolução espacial da banda pancromática (DIGITALGLOBE, 2017).

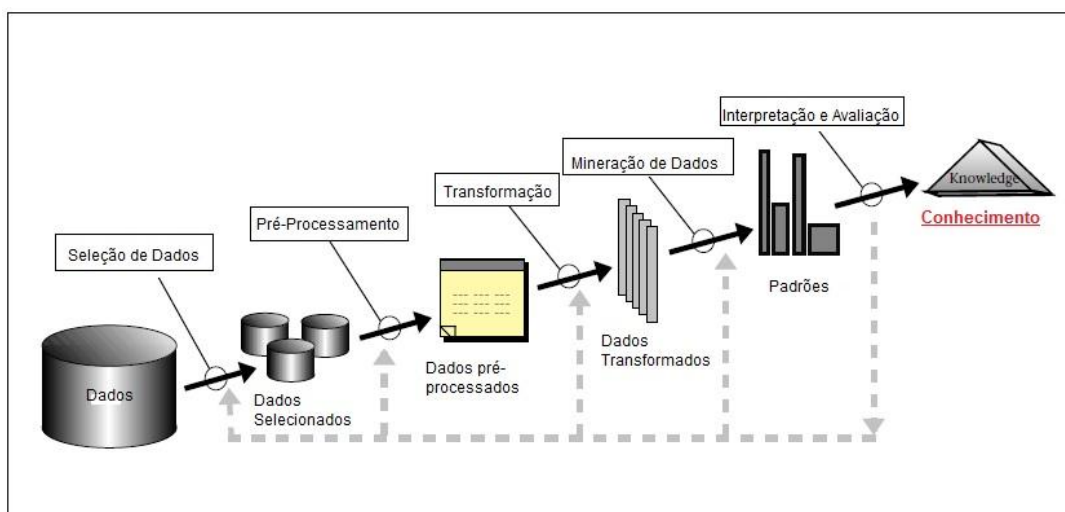
Algumas das principais aplicações desse sensor são: mapeamentos temáticos, classificação geomorfológica, auxílio no preparo e resposta a desastres, detecção de mudanças, análise de solos e vegetação, aplicações geológicas (exemplos: mineração, extração de gás e petróleo), monitoramento ambiental, etc. (DIGITALGLOBE, 2017).

2.7 Mineração de Dados

Com o avanço das técnicas de Sensoriamento Remoto e com o grande volume de dados digitais disponíveis, é de fundamental importância determinar quais dados e informações são essenciais para certo trabalho ou pesquisa, sendo este um passo importante para a obtenção de resultados de boa qualidade. Entretanto, a identificação de dados mais relevantes para uma análise por meio dos métodos convencionais pode ser trabalhosa e demorada. A partir dessa necessidade, surgiu o *Knowledge Discovery in Databases* (KDD).

De acordo com Fayyad (1996), o KDD é todo um processo que busca extrair informações e conhecimento dos dados, sendo a Mineração de dados a sua principal etapa, como apresentado na Figura 2.14. Este processo engloba as seguintes etapas: seleção dos dados, pré-processamento, transformação, mineração de dados, avaliação e interpretação. O resultado final é o conhecimento adquirido pelo usuário.

Figura 2.14. Etapas de *Knowledge Discovery in Database* (KDD).



Fonte: Adaptado de Fayyad et al. (1996)

De acordo com Han et al. (2012, p. 5), “mineração de dados é o processo de descobrimento de padrões e o conhecimento a partir de um grande volume de dados”. Através de algoritmos que utilizam diferentes técnicas, a mineração de

dados busca encontrar padrões, extrair atributos e informações dos dados, agrupando-os de forma automática. Pode ter caráter descritivo ou preditivo. O primeiro caracteriza as propriedades dos dados de um conjunto, enquanto que o segundo busca uma generalização dos dados, de modo a fazer previsões sobre os mesmos (HAN et al., 2012).

Algumas das técnicas usadas são: métodos estatísticos, redes neurais, lógica *fuzzy*, árvores de decisão, entre outros (GOLDSCHMIDT; PASSOS, 2005). Os métodos estatísticos podem ser utilizados para resumir ou descrever um conjunto de dados, além de auxiliar na validação dos resultados gerados pela mineração. “Estatística é útil para minerar vários padrões dos dados, assim como para compreender os mecanismos que afetam esses padrões” (HAN et. al., 2012, p. 24).

Para a área de Sensoriamento Remoto, a Mineração de dados busca encontrar atributos e características que estejam presentes nos pixels ou objetos (regiões) das imagens digitais. As informações podem apresentar caráter espacial, espectral etc. (NOVO, 2010). O trabalho desenvolvido por Körting et al., (2013) é um exemplo de sistema que utiliza as técnicas de mineração de dados para a análise de imagens: GeoDMA. Os algoritmos utilizados no GeoDMA podem ser: Árvores de Decisão, *Self-Organized Maps* (SOM), ou Redes Neurais.

Pode-se citar ainda o *software* WEKA, utilizado nos trabalhos de Pinho et al. (2012), Novack (2009), Carvalho (2011), Bento (2017), que executa a mineração de dados a partir do algoritmo C4.5. Além disso, há a plataforma eCognition, que possui implementado, entre outros, o algoritmo CART (*Classification and Regression Trees*), utilizado por Bento (2017).

2.8 Classificação

Após a execução da etapa de Mineração de dados, os dados são agrupados e classificados de acordo com suas características (espectrais, textura, forma,

cor, tonalidade etc.). Para a classificação temática com imagens de alta resolução espacial, é normalmente utilizado o paradigma da classificação baseada em objeto (*Object-based Image Analysis* - OBIA).

Segundo Pinho et al. (2012), considerando este paradigma, são extraídas as informações semânticas da imagem a partir da análise dos objetos da mesma, assim como a sua relação com os objetos vizinhos (contexto). O paradigma OBIA permite desenvolver teorias e métodos que facilitam a análise e extração de informações, de modo semiautomático, das imagens mencionadas (HAY; CASTILLA, 2006; DRONOVA, 2015, CHEN, 2018). A sua principal vantagem é dividir a imagem em objetos de modo similar àqueles obtidos pela visão humana, facilitando sua interpretação. A utilização dessa classificação permite obter elementos como textura, forma, etc. No entanto, apresenta alta dependência da segmentação realizada, podendo os resultados variar de acordo com diferentes níveis de segmentação (HAY; CASTILLA, 2006; DRONOVA, 2015; CHEN, 2018).

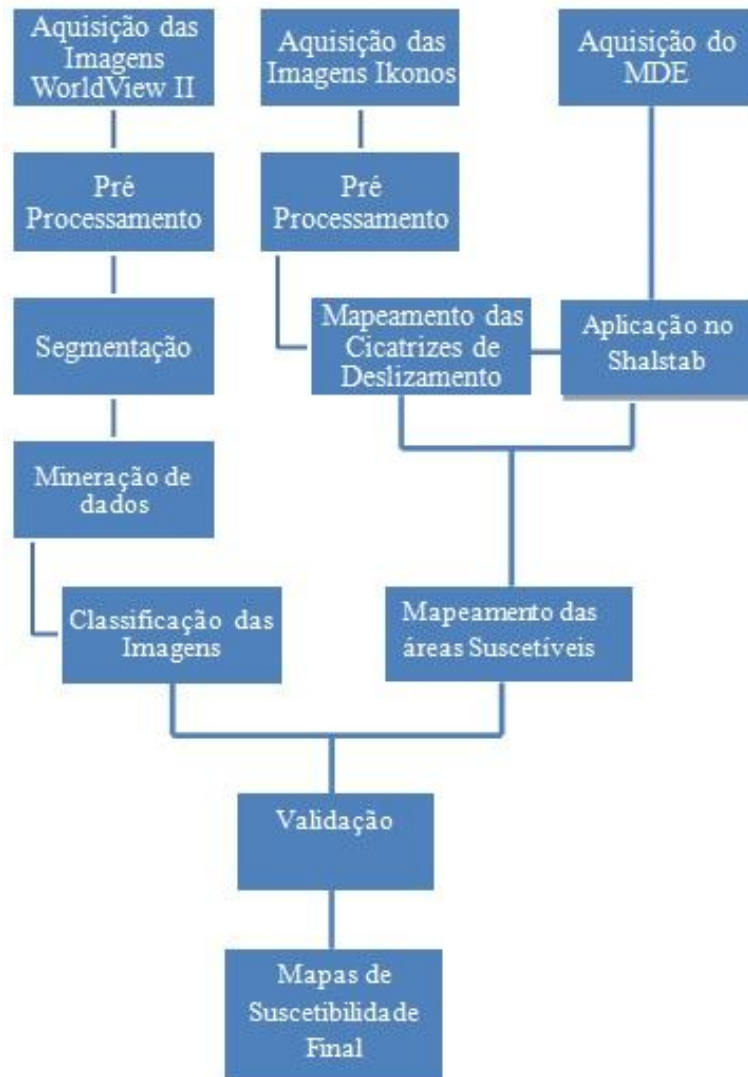
3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste trabalho foram utilizadas imagens de alta resolução espacial do sensor WorldView 2, fornecidas sem ônus pela Digital Globe. A sua data de aquisição foi de 27 de dezembro de 2014, sendo esta a imagem mais recente com a menor cobertura de nuvens. Utilizou-se ainda uma imagem do sensor IKONOS, datada de abril de 2000 e cedida pela empresa ENGESAT, para mapeamento das cicatrizes de deslizamento. Modelos Digitais de Elevação (MDE) foram utilizados para a análise das vertentes e declividade do terreno.

Os processamentos de imagem e mapeamentos foram realizados através dos *softwares Arcgis*, ENVI, ERDAS e *eCognition*, assim como o modelo matemático *Shalstab*. A Figura 3.1 apresenta o fluxograma referente à metodologia utilizada.

A execução do pré-processamento é de fundamental importância nas imagens WorldView-2 obtidas. Nesta etapa foi realizada a fusão das imagens das bandas multiespectrais com a banda pancromática, e a sua ortorretificação, utilizando respectivamente os *softwares* ENVI e ERDAS Imagine. A aquisição dos pontos de controle (GCP – *Ground Control Point*) foi realizada durante o trabalho de campo no dia 06 de julho de 2017, com o 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.

Figura 3.1. Fluxograma da metodologia utilizada.



Para a imagem do sensor IKONOS, cedidas pela ENGESAT, a etapa de pré processamento consistiu apenas na fusão da banda pancromática com as bandas multiespectrais, através do método *Gram-Schmidt* e escolha da utilização da composição cor verdadeira R3G2B1. Assim, foi possível identificar e vetorizar as cicatrizes de deslizamentos. Ressalta-se que as cicatrizes de deslizamento foram identificadas tanto pela análise visual dessa imagem quanto pela literatura, conforme os trabalhos de Ahrendt (2005) e Prieto et al. (2017).

O MDE foi obtido do projeto Topodata, executado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), por Valeriano (2005), carta 22S465, na escala 1:250.000. O MDE foi inserido no modelo *Shalstab*, juntamente com dados de coesão, ângulo de atrito interno, densidade do solo, profundidade do solo e dados hidrológicos, obtidos da literatura. O resultado gerado pelo modelo é um mapa indicando locais suscetíveis à ocorrência de deslizamentos de massa.

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 dos bairros escolhidos como áreas teste: Britador e Vila Albertina. Dessa forma, foi necessária a vetorização manual de todas as quadras e ruas existentes nas áreas escolhidas. Este procedimento foi realizado com o *software Arcgis*. A importância dessa etapa consiste na melhora da acurácia durante o processo de segmentação.

Posteriormente, utilizando o *layer* temático, realizou-se o primeiro nível de segmentação das imagens, representando as quadras e ruas. E para a correta segmentação de objetos como vegetação, telhados e solo exposto, executou-se um segundo nível de segmentação. O processo de segmentação foi realizado utilizando o *software eCognition*. Esse *software* permite a análise semi automática de dados de Sensoriamento Remoto e dispõe de diferentes algoritmos que favorecem a segmentação e classificação das imagens, como por exemplo: segmentação multi resolução e classificação por vizinho mais próximo (*eCognition*, 2017).

A imagem segmentada é classificada de acordo com os atributos mais relevantes, sendo que estes foram selecionados na etapa de Mineração de dados, através do algoritmo CART, implementado no *eCognition*. Para a sua validação, foi realizada uma análise entre ambos os resultados, de modo a estabelecer um mapa final com as áreas de suscetibilidade à deslizamentos de terra.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Fusão das Imagens

A primeira etapa do pré-processamento dos dados foi a fusão das bandas multiespectrais com a banda pancromática. Como resultado, obteve-se uma imagem com as características espectrais provenientes das bandas multiespectrais e resolução espacial de 0,50 m, obtido pela banda pancromática.

O procedimento de fusão escolhido foi o método *Gram-Schmidt*, pois este gerou uma imagem com melhor nitidez das feições e objetos de interesse. Ou seja, a distinção entre as edificações, vegetação e solo exposto ficaram mais facilmente identificáveis, favorecendo as etapas de segmentação, coleta de amostras e classificação. De acordo com Pesk et al. (2011), a técnica de fusão *Gram-Schmidt* conserva melhor o brilho. Segundo Polizel et al. (2011), esta fusão apresenta índices médios de correlação com a imagem original superiores à fusão por Componentes Principais, sendo, portanto, mais recomendada a sua utilização. Outros autores, como Pu e Landry (2012) e Meneghetti e Kux (2014) também optaram pela fusão *Gram-Schmidt* em seus trabalhos. A Figura 4.1 apresenta recortes das imagens nas bandas: pancromática (A), multiespectral (B) e o resultado da fusão (C).

Figura 4.1. Recortes das imagens de entrada (A – banda pancromática e B – bandas multiespectrais, composição verdadeira R5G3B4) e C - resultado da fusão.



4.2 Ortorretificação

As imagens coletadas através de sistemas sensores localizados em plataformas orbitais costumam apresentar distorções. Estas são provenientes de diversos fatores, como o ângulo de visada do sensor, a variação de movimento e altitude da plataforma em que se encontra o sensor, da topografia da área de estudo, da curvatura terrestre, entre outros. Essas distorções impossibilitam o cruzamento das informações da cena, com dados do Sistema de Informação Geográfica – SIG e por isso, corrigi-las é uma etapa de fundamental importância em trabalhos com imagens de satélite (TOUTIN, 2004). Este processo é denominado de Ortorretificação.

A orrorretificação consiste na reprojeção da imagem no plano ortogonal, a fim de eliminar eventuais distorções relativas a alvos que se elevam acima da

superfície terrestre durante a aquisição da cena pelo sensor. As correções são feitas através de modelos físicos ou empíricos, a saber: modelo rigoroso, modelo polinomial 2D/3D e funções racionais 3D, respectivamente. Utiliza-se também um MDE para informações referentes ao relevo da área em estudo.

Para a ortorretificação da imagem do sensor WorldView-2 utilizada nesta pesquisa, optou-se pela utilização do Modelo Rigoroso, pois o mesmo apresentou resultados mais precisos, como se pode mostrar no trabalho de Rodrigues (2014) e Araújo et al. (2008). De acordo com Toutin (2004), este modela matematicamente os parâmetros físicos, como ângulo de visada do sensor, velocidade, localização e altitude da plataforma, além da topografia da área.

A execução da ortorretificação teve como dados de entrada 20 GCPs (*Ground Control Points*) adquiridos durante o trabalho de campo, assim como o MDE, obtido através do site Topodata (<http://http://www.dsr.inpe.br/topodata/acesso.php>). Esses dados foram introduzidos no *software* ERDAS Imagine 2015, que executou a ortorretificação da cena de interesse, resultando na ortoimagem. A análise estatística da Raiz do Erro Médio Quadrático (do inglês: *Root-Mean Square Error* – RMSE) e desvio padrão, é computada pelo próprio *software*. Esses valores servem para a verificação da qualidade do produto gerado. Os valores obtidos nessa ortorretificação são 0,32 e 0,21, referentes respectivamente ao RMSE e desvio padrão.

4.3 Segmentação

A segmentação da imagem foi realizada através do *software eCognition*, utilizando o *layer* temático, parâmetros de forma, compacidade e escala. No primeiro nível de segmentação, o *layer* temático teve grande peso, pois o *software*

baseou-se nele para a correta identificação das quadras e ruas. Os parâmetros usados foram: forma (0,9), compacidade (0,5) e escala (60). Para o

segundo nível de segmentação, com a finalidade de identificação das classes de vegetação, solo exposto e telhados, os parâmetros utilizados foram: forma (0,1), compacidade (0,5) e escala (30).

A Figura 4.2 apresenta um recorte da cena trabalhada (A) com a segmentação realizada (B). Nesta imagem, os parâmetros utilizados foram: forma (0,1), compacidade (0,5) e escala (30).

Figura 4.2. Segmentação da imagem: A - imagem composição verdadeira. B - imagem segmentada.



4.4 Seleção de Amostras

A etapa de seleção de amostras consiste em selecionar na imagem feições e objetos representativos das classes, conforme apresentado na Figura 4.3. As classes de cobertura selecionadas estão descritas na Tabela 4.1.

Figura 4.3. Exemplo de amostras coletadas.

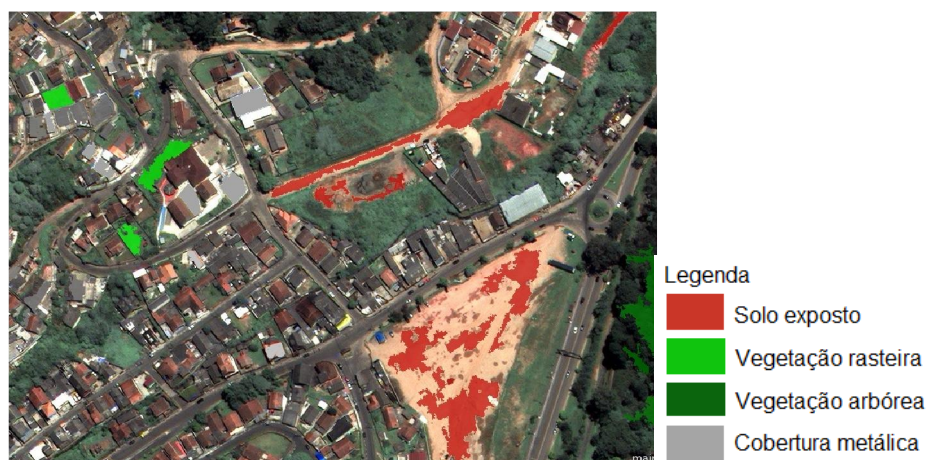








Tabela 4.1. Definição das Classes de Cobertura da Terra.

Classes	Amostras	Cor R(5)G(3)B(2)	Localização e Contexto	Forma, tamanho e textura
Vegetação Arbórea		Verde escuro e verde médio.	Em ruas, parques, áreas de preservação.	Forma irregular, textura rugosa e tamanho variável.
Vegetação rasteira		Verde claro a médio.	Em quadras de futebol, quintais, áreas rurais.	Forma irregular, textura lisa e tamanho variável.
Solo Exposto		Alaranjado com nuances beges.	Áreas de deslizamento, ruas não pavimentadas, áreas de construções.	Forma irregular, tamanhos variáveis e texturas lisas e rugosas.
Cobertura de Cerâmica		Tons de laranja avermelhado.	Dentro de quadras e ruas.	Textura lisa, tamanho pequeno e forma retangular.
Coberturas Metálicas		Variações de cinza claro a cinza médio.	Dentro de quadras e galpões.	Textura lisa, tamanho variável e forma retangular.
Via Pavimentada		Cinza escuro.	Em ruas e áreas urbanas.	Textura lisa, forma alongada e tamanhos variáveis.

4.5 Mineração de Dados

Para a identificação dos atributos mais relevantes neste estudo, foi realizada a mineração de dados, através do algoritmo CART, disponível na plataforma *eCognition*. A execução desse processo foi realizada em três etapas, a saber: operação de treinamento (*Train*), operação de análise (*Query*) e operação de aplicação dos resultados da mineração de dados (*Apply*).

A primeira etapa consiste na geração de um arquivo, com as informações estatísticas dos objetos selecionados na fase de seleção de amostras. Essas informações estatísticas baseiam-se nos atributos selecionados e em parâmetros estabelecidos pelo usuário resultando em uma árvore de decisão contendo as variáveis e limiares determinantes para a identificação e separação de cada classe. A operação de análise (*Query*) permite a visualização e análise da árvore de decisão gerada na operação *Train* (anexo A). E a última etapa consiste na aplicação dos limiares e variáveis, a fim de classificar a imagem.

4.6 Classificação

A partir dos limiares definidos pela árvore de decisão, gerada na etapa de Mineração de dados, classificaram-se os recortes das áreas de estudo, conforme apresentado nas Figuras 4,4 e 4.5. As Tabelas 4.2 e 4.3 apresentam os dados referentes às matrizes de confusão, exatidão global e índice *Kappa*, provenientes das classificações.

Figura 4.4. Classificação do bairro Vila Albertina.

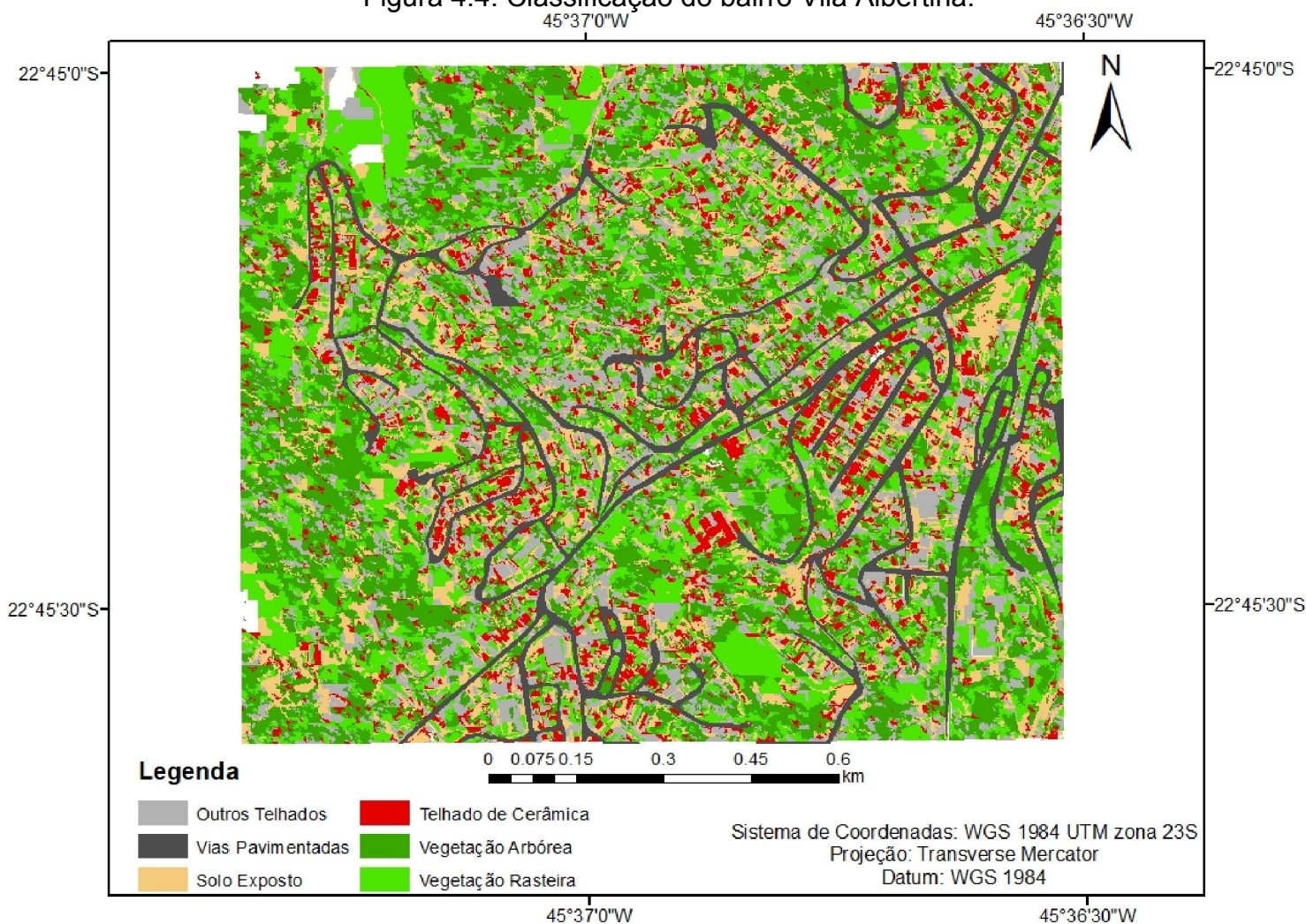


Tabela 4.2. Matriz de Confusão da Classificação da Vila Albertina.

Classificação/Referência	Cobertura cerâmica	Outros Telhados	Solo exposto	Vegetação arbórea	Vegetação rasteira	Via pavimentada	Total	Exatidão do Usuário
Cobertura cerâmica	105	3	4	0	0	0	112	0,94
Outros telhados	3	87	4	1	1	4	100	0,87
Solo exposto	15	0	58	0	2	0	75	0,77
Vegetação arbórea	0	1	0	82	3	0	86	0,95
Vegetação rasteira	1	0	1	3	132	12	149	0,89
Via pavimentada	1	5	1	0	1	8	16	0,50
Total	125	96	68	86	139	24	538	
Exatidão produtor	0,84	0,91	0,85	0,95	0,95	0,33		
Exatidão Global	0,88							
Índice Kappa	0,63							

Figura 4.5. Classificação do bairro Britador.

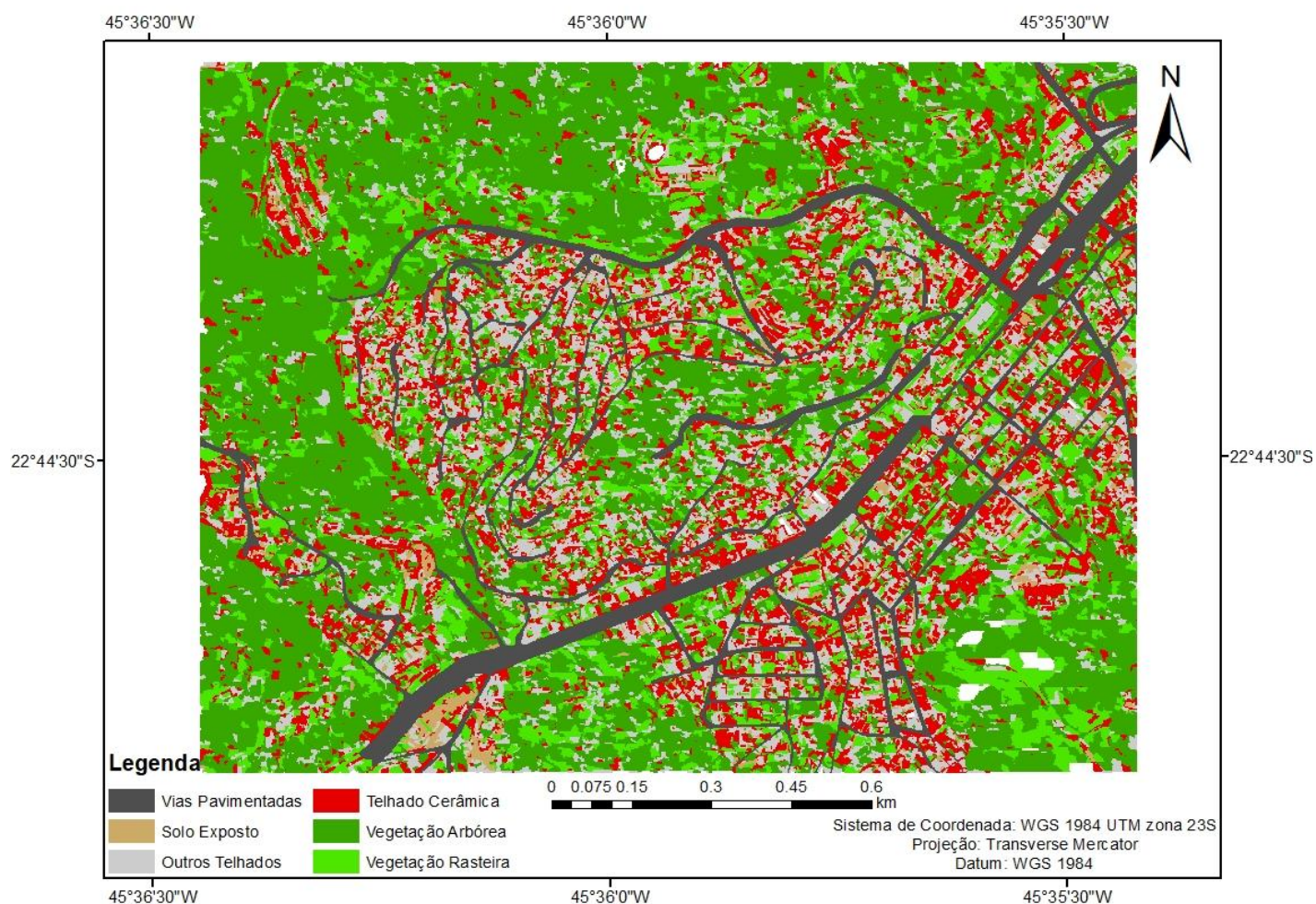


Tabela 4.3. Matriz de Confusão da Classificação do Britador.

Classificação/referência	Vegetação arbórea	Outros Telhados	Solo exposto	Cobertura 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							

A partir das estatísticas obtidas pela matriz de confusão (índice *Kappa*) 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. A fim de facilitar a interpretação dos resultados, Landis e Koch (1977) agruparam os dados quantitativos referentes ao *Kappa*, e transformaram-nos em qualitativos, conforme observado na Tabela 4.4.

Tabela 4.4. 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 da tabela 4.4, conclui-se que as classificações apresentaram desempenho “Bom”. No entanto, observa-se que as classes que apresentaram maior confusão espectral entre si, foram telhado de cerâmica e solo exposto. Isso se deve à semelhança do material componente: a argila, presente em ambos os casos. Convém ressaltar que 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 estádios fenológicos 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 4.5. E a Vila Albertina tem 25% da área total com algum tipo de cobertura vegetal (787m²), 67,3% da área total com alguma alteração antrópica (2369m²), conforme Tabela 4.6. 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 fique atinja a saturação rapidamente, além de proteger o solo contra processos erosivos.

Tabela 4.5. Área de cada Classe da Classificação para o Britador.

Classes	Área em m²	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

Tabela 4.6. Área de cada Classe de Classificação para a Vila Albertina.

Classes	Área em m²	Área (%)
Solo Exposto	242	7,6
Telhado de Cerâmica	156	4,9
Outros Telhados	301	9,5
Vegetação Arbórea	442	14,1
Vegetação Rasteira	345	10,9
Vias Pavimentadas	1670	52,9
TOTAL	3156	100

Com relação à ocupação humana, é possível observar que as áreas em estudo apresentam 2.890 m² e 2.369m² (Britador e Vila Albertina, respectivamente) de construções composta por ruas, telhados e solo exposto (69,5% da área total e 67,3% da área total nos bairros Britador e Vila Albertina, respectivamente). 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.

4.7 Modelo Digital de Elevação

O modelo digital de elevação (MDE) é o dado de entrada essencial para a execução do modelo matemático *Shalstab*. O MDE foi obtido a partir do projeto Topodata, realizado no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) por Valeriano (2005), carta 22S465, na escala 1:250.000. As Figuras 4.6 e 4.7 apresentam os mapas de declividade das áreas teste, elaborados através do *software ArcGis*. Os parâmetros de escala da declividade do relevo baseiam-se

nos estudos de Ross (1994) sobre fragilidade ambiental. Em seus estudos, Ross (1994) leva em consideração a relação entre as características do solo (textura, estrutura, plasticidade, grau de coesão das partículas e espessura) com a capacidade da densidade da drenagem em dissecar o relevo.

Figura 4.6. Mapa de Declividade do Britador.

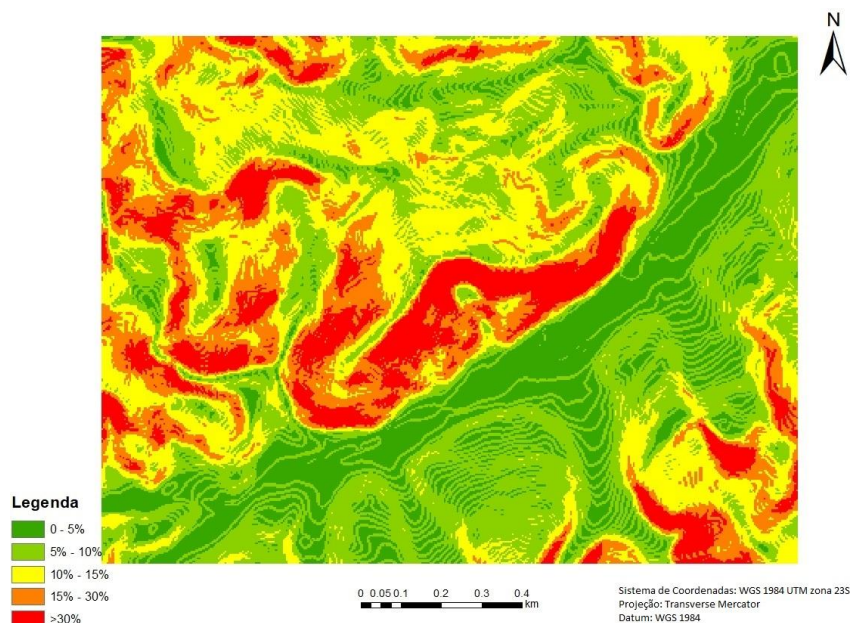
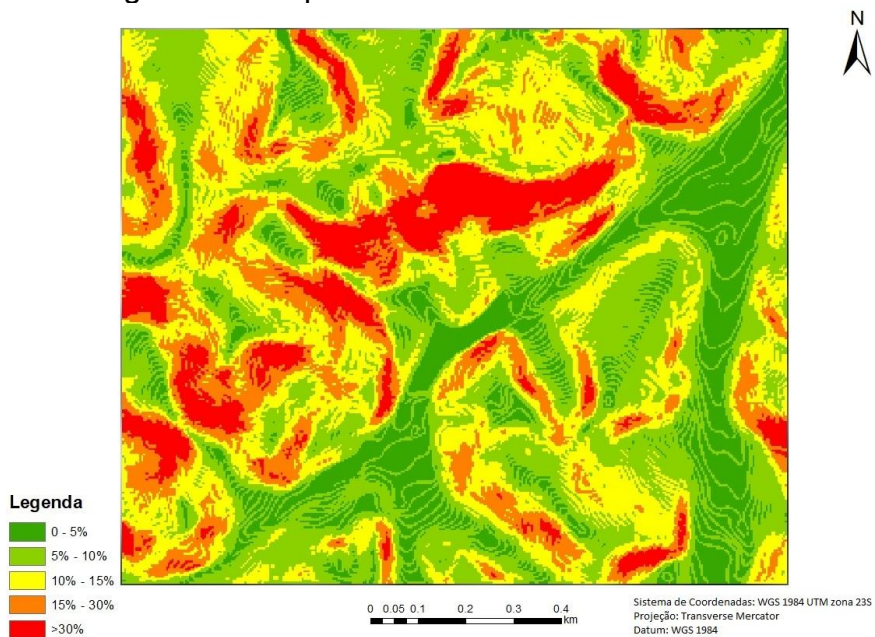


Figura 4.7. Mapa de Declividade da Vila Albertina.



A partir da análise visual dos MDEs dos bairros em estudo, observa-se que em ambos há áreas com declividades superiores à 30%. Tratam-se de locais que pela declividade, já podem ser considerados como inapropriados para a construção de habitações humanas, tanto no meio urbano quanto no rural (PRIETO et al., 2017). Entretanto, quando as imagens do WorldView-2 são sobrepostas aos mapas de declividade (Figuras 4.8 e 4.9), pode-se observar que há construções nessas áreas.

Figura 4.8. Sobreposição do mapa de declividade com as cenas do WorldView-2 na Vila Albertina.

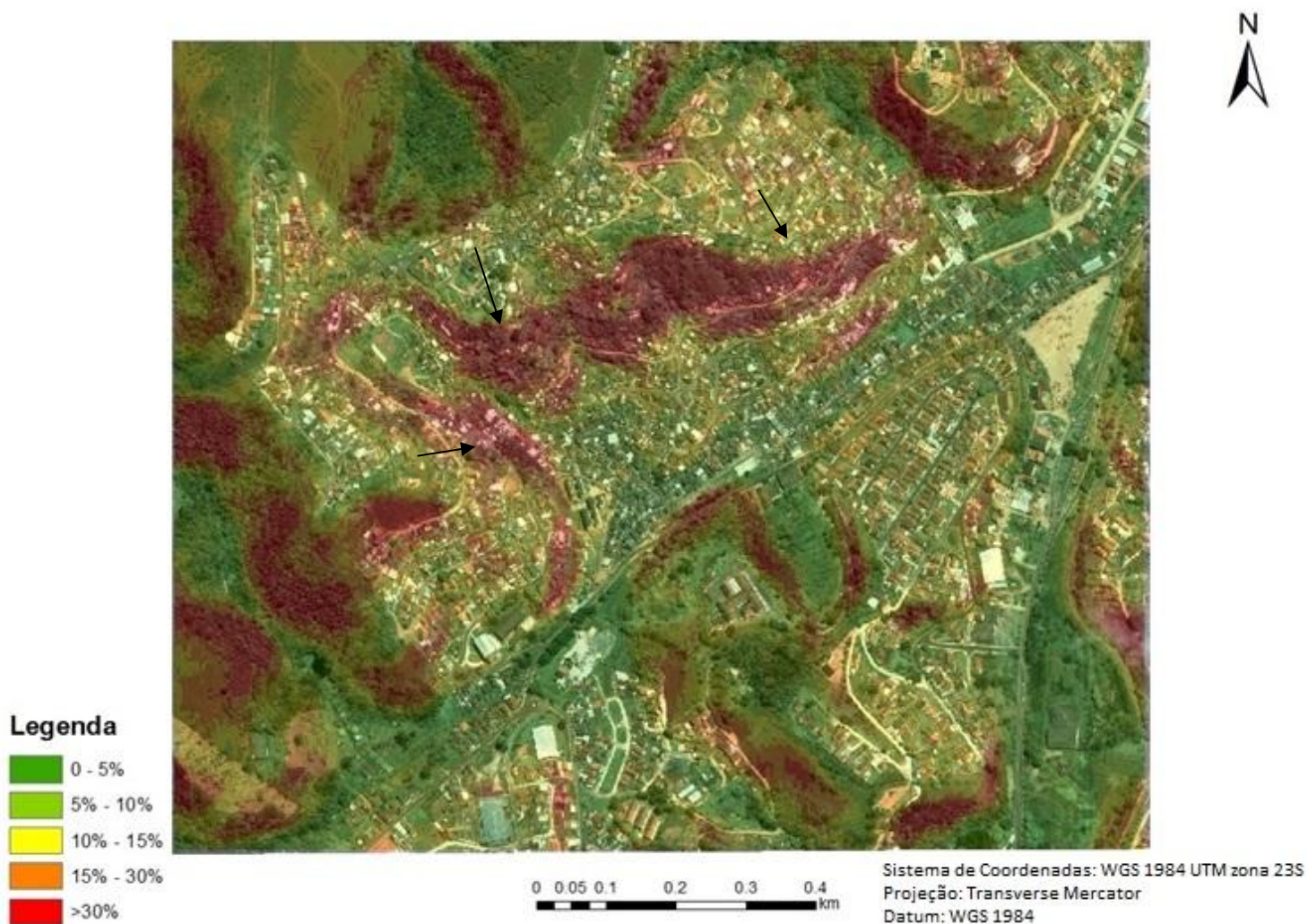
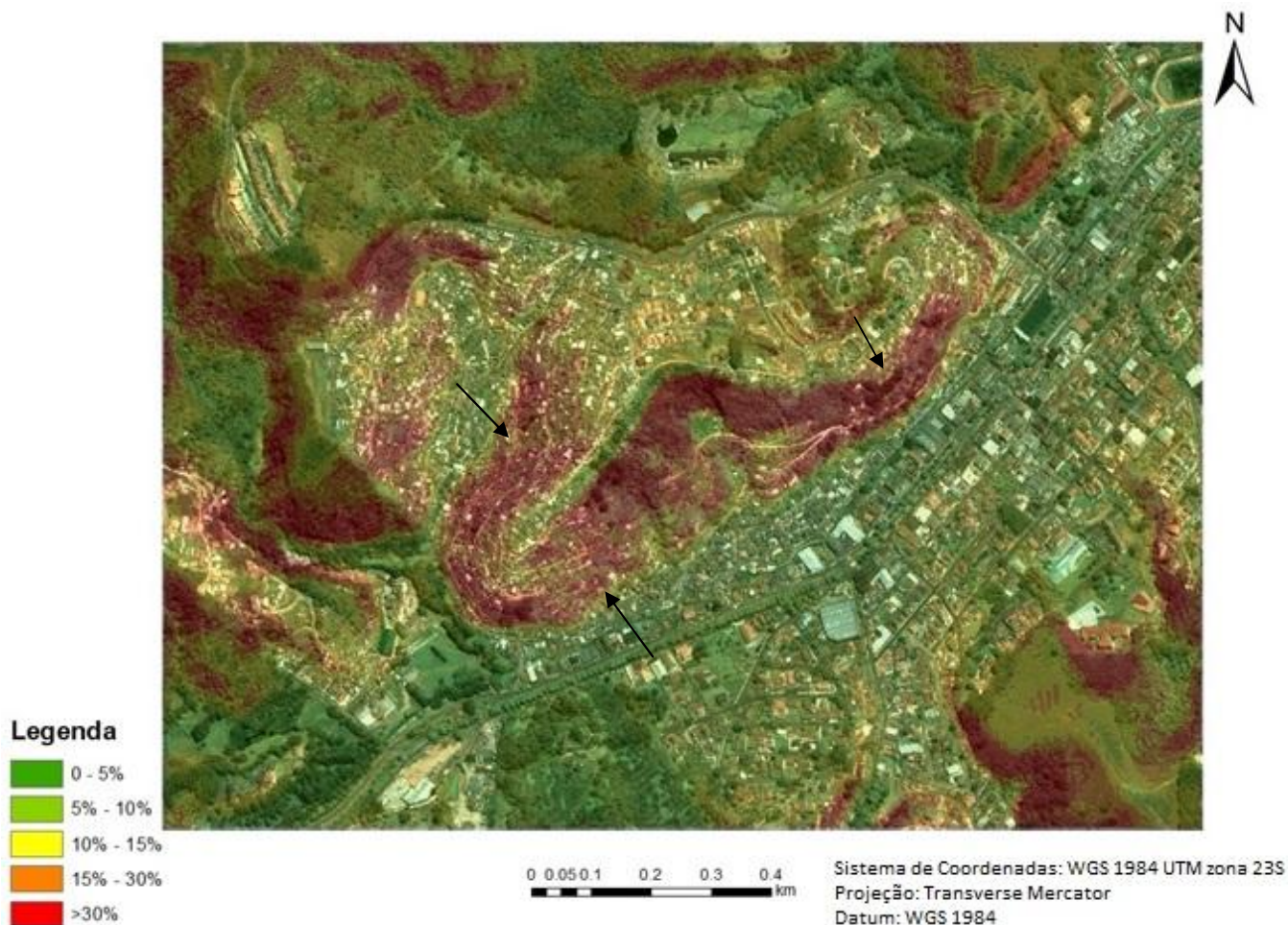


Figura 4.9. Sobreposição do mapa de declividade com as cenas do WorldView-2 no Britador.



4.8 Resultados *Shalstab*

O modelo matemático *Shalstab* tem como resultado mapas que representam as áreas com maior e menor susceptibilidade à ocorrência de deslizamentos. Para a verificação de quais parâmetros geotécnicos mais influenciam os movimentos de massa, foram testados diversos cenários, alterando-se os valores, um a um, dos parâmetros de entrada do modelo *Shalstab*, conforme consta na Tabela 4.7. Os dados geotécnicos utilizados foram extraídos da literatura, a saber: Ahrendt (2005), Mendes e Valério Filho (2015), Prieto et al. (2017), Mendes et al. (2018a) e Mendes et al. (2018b). 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. Nas Figuras 4.10 à 4.19 estão representados os mapas, com os diferentes cenários, resultantes do modelo matemático. Os resultados foram agrupados dois a dois, a fim de facilitar a comparação das variações dos parâmetros. E nos anexos B e C, é possível visualizar de forma agrupada, todos os resultados dos 10 cenários de cada bairro.

Tabela 4.7. Cenários com diferentes valores no *Shalstab*.

Parâmetros de Entrada	Ângulo de atrito interno	Densidade do Solo	Profundidade do Solo	Coesão	
Valores	30°	1600 kg/m ³	0,5m	1000 N/m ²	Cenário 1
	33°	1600 kg/m ³	0,5m	1000 N/m ²	Cenário 2
	35°	1600 kg/m ³	0,5m	1000 N/m ²	Cenário 3
	30°	1700 kg/m ³	0,5m	1000 N/m ²	Cenário 4
	30°	1800 kg/m ³	0,5m	1000 N/m ²	Cenário 5
	30°	1600 kg/m ³	1m	1000 N/m ²	Cenário 6
	30°	1600 kg/m ³	2m	1000 N/m ²	Cenário 7
	30°	1600 kg/m ³	0,5m	1500 N/m ²	Cenário 8
	30°	1600 kg/m ³	0,5m	2000 N/m ²	Cenário 9
		35°	1800 kg/m ³	2m	2000 N/m ²

Figura 4.10. Cenários 1 e 2 do Britador.

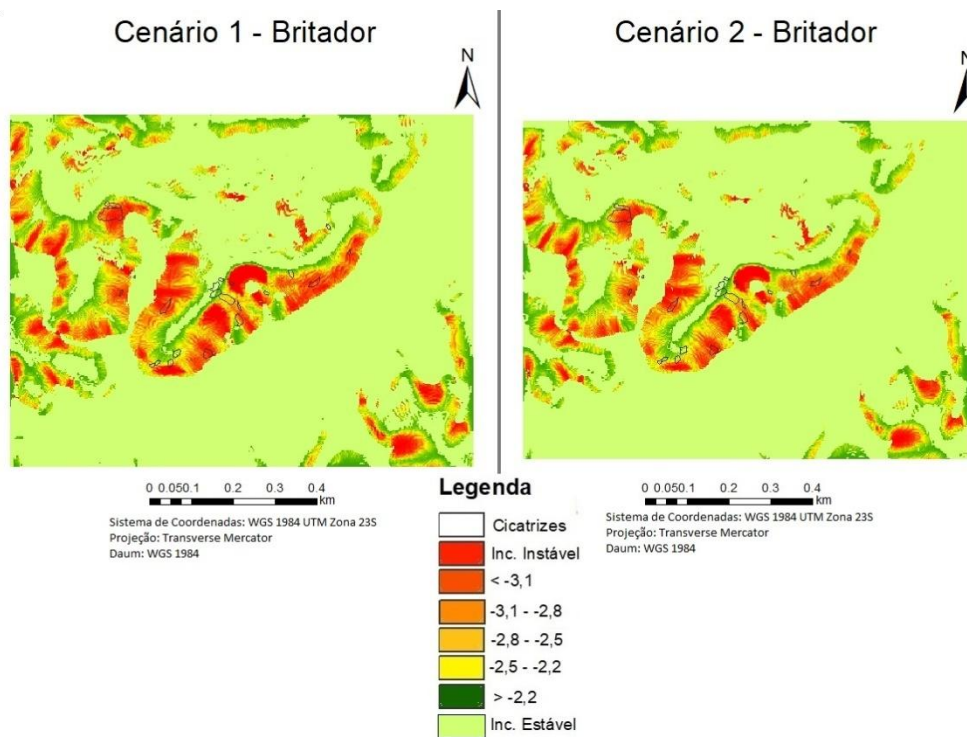


Figura 4.11. Cenários 1 e 2 Vila Albertina.

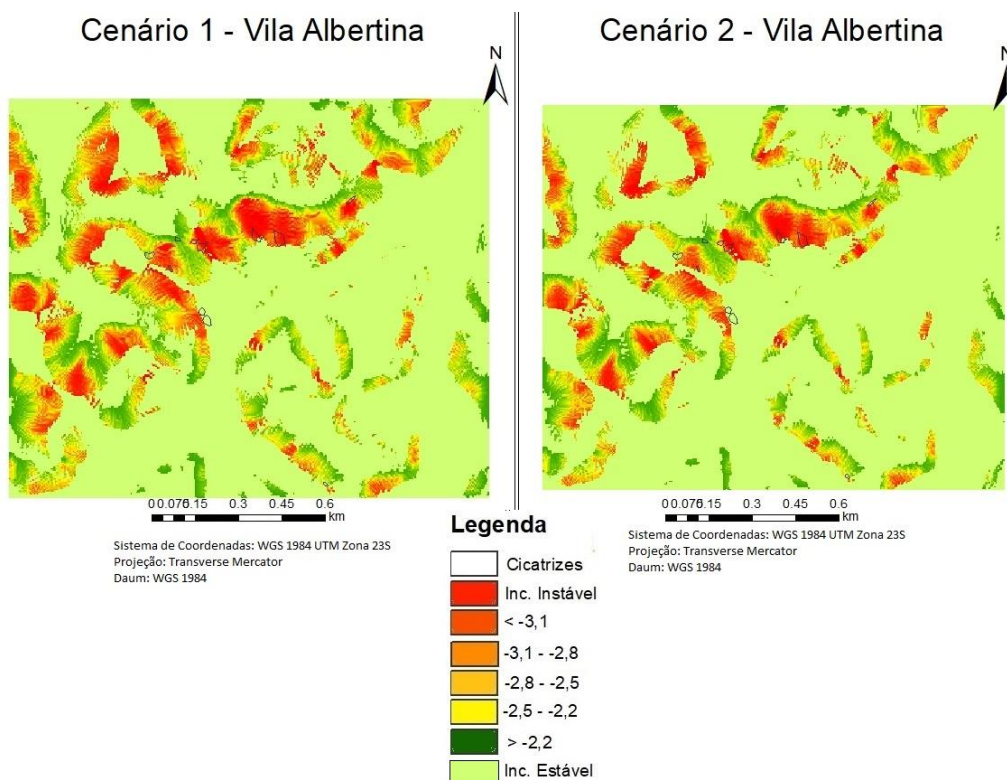


Figura 4.12. Cenários 3 e 4 Britador.

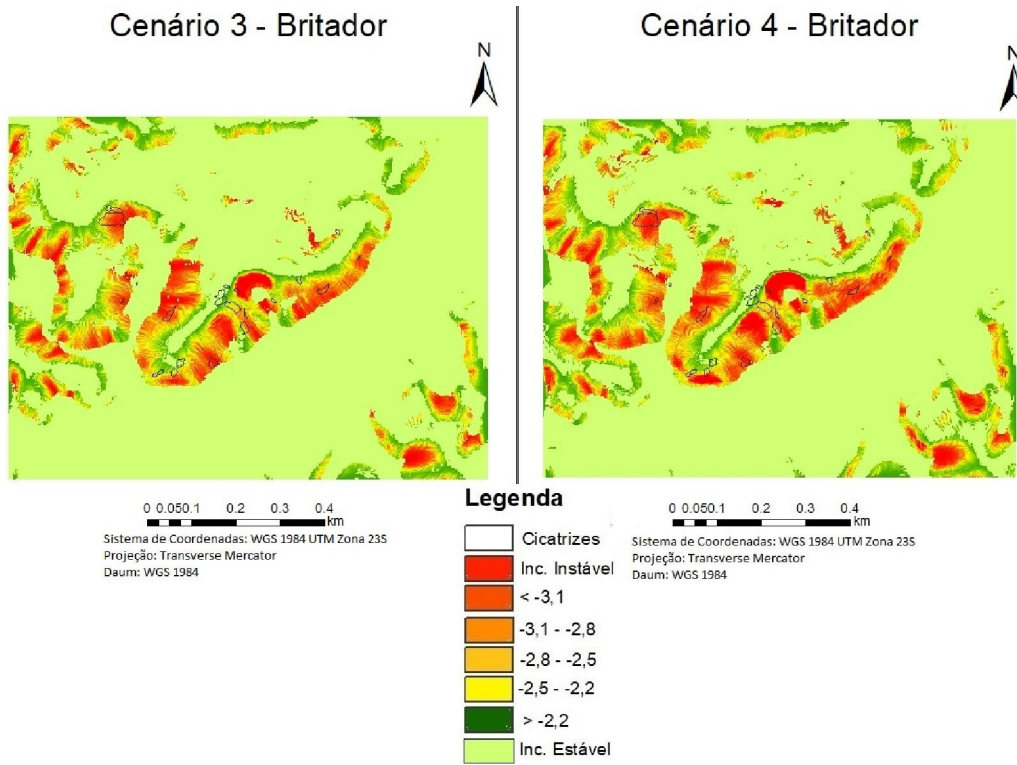


Figura 4.13. Cenários 3 e 4 Vila Albertina.

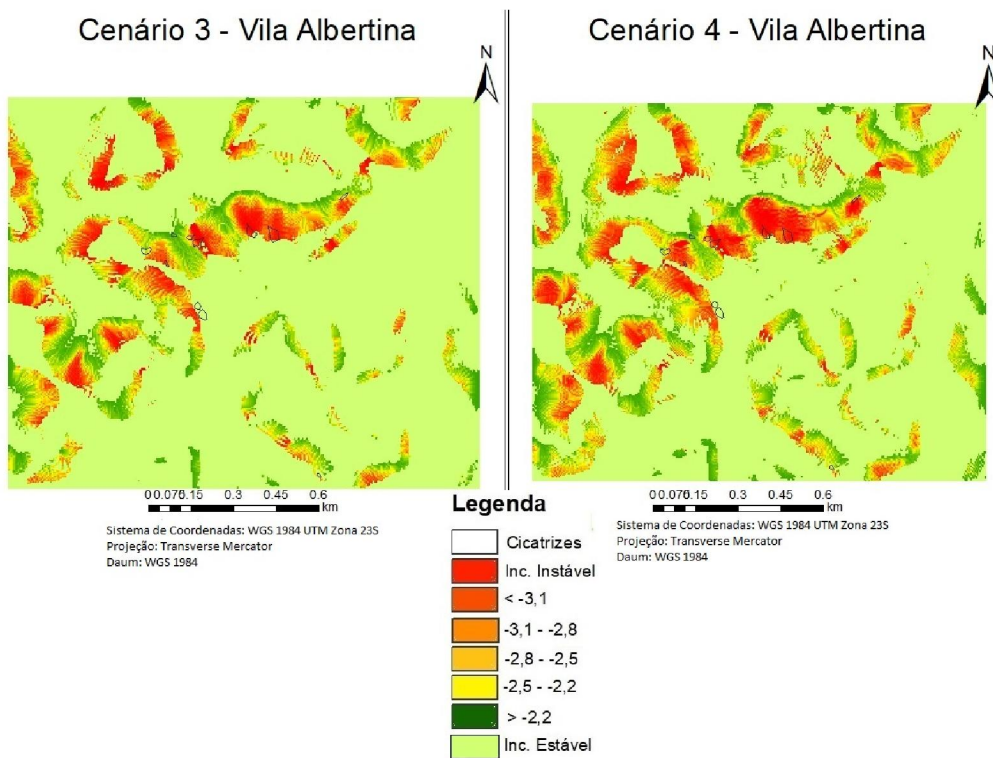


Figura 4.14. Cenários 5 e 6 Britador.

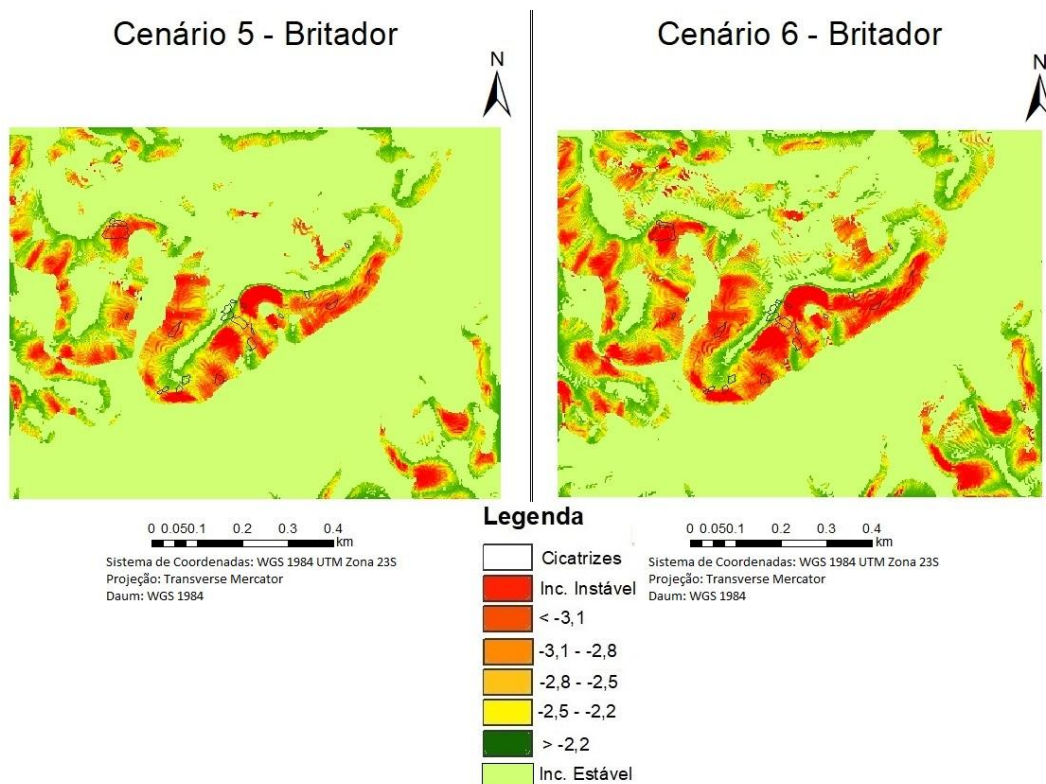


Figura 4.15. Cenários 5 e 6 Vila Albertina.

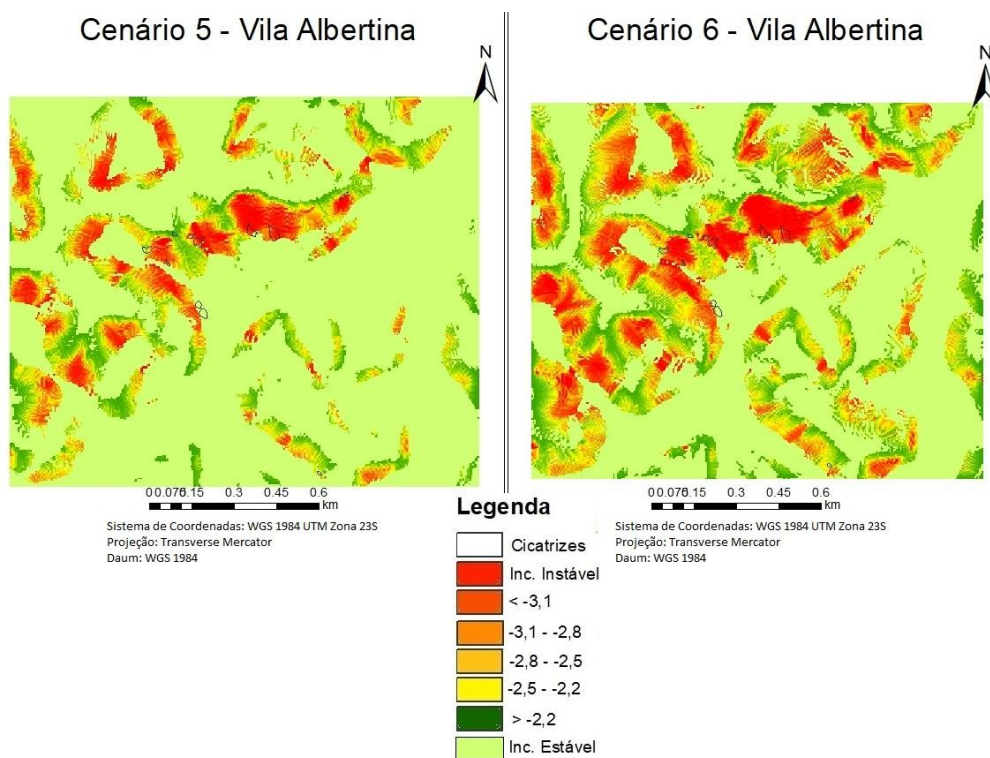


Figura 4.16. Cenários 7 e 8 Britador.

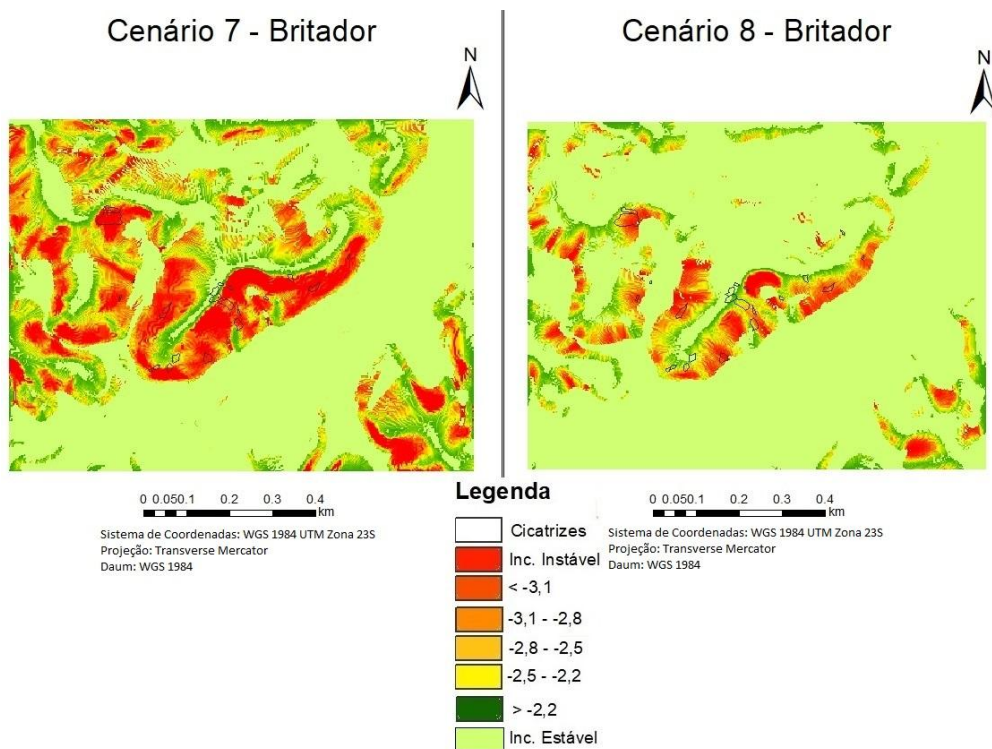


Figura 4.17. Cenários 7 e 8 Vila Albertina.

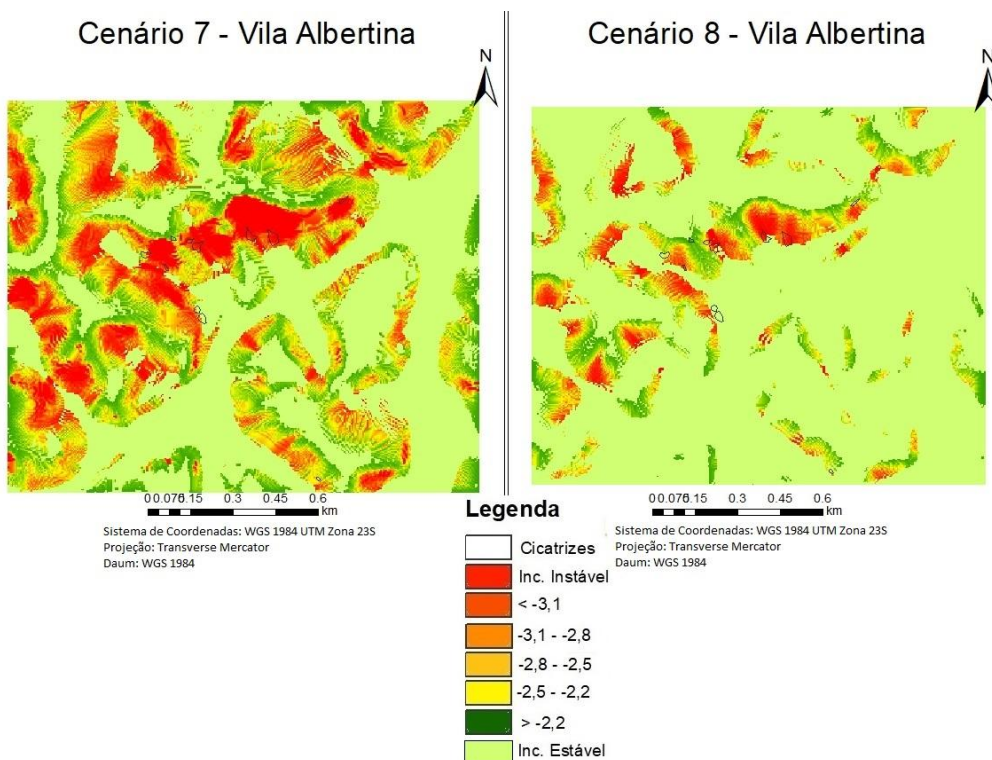


Figura 4.18. Cenários 9 e 10 Britador.

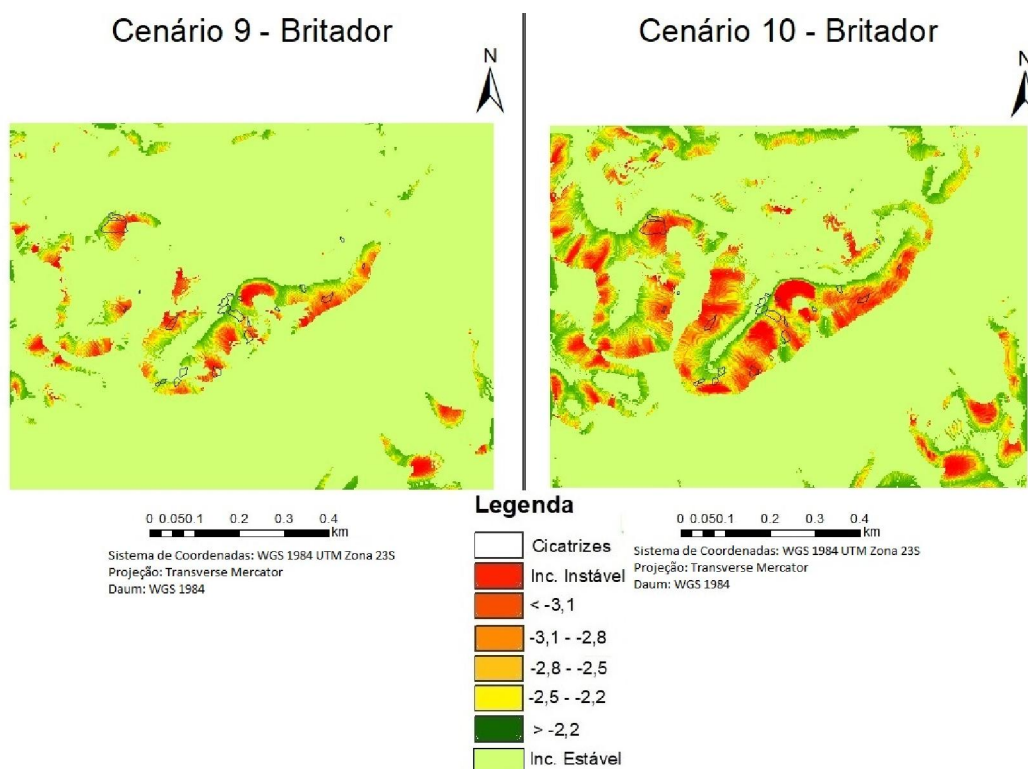
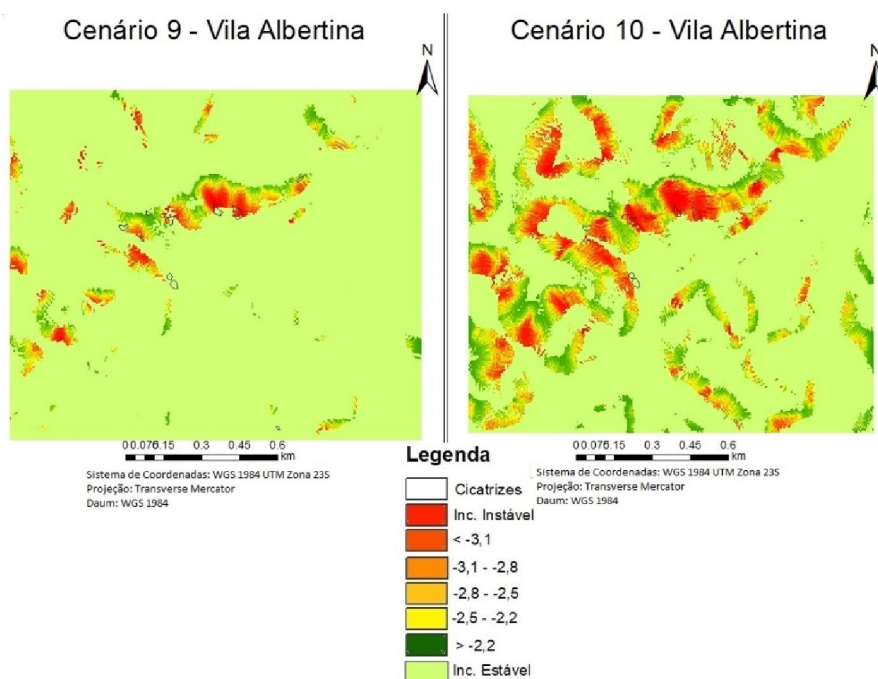


Figura 4.19. Cenários 9 e 10 Vila Albertina.



A partir da análise dos resultados provenientes do *Shalstab*, observa-se que este modelo matemático é adequado para a identificação de áreas suscetíveis à ocorrência de deslizamentos. Isto porque áreas representadas em tons de vermelho, ou seja, consideradas pelo modelo como Incondicionalmente Instáveis, apresentam cicatrizes de deslizamento.

Os resultados encontrados pelo modelo matemático *Shalstab* corroboram com o mapeamento das áreas de risco à deslizamento de encosta (anexo D), realizado pelo Instituto Geológico - IG (2014), na escala 1:50.000. Apesar das diferenças metodológicas, haja vista que o IG trabalhou a partir de ortofotos digitais provenientes do levantamento aerofotogramétrico desenvolvido pela Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano – Emplasa, os resultados referentes as áreas de maior suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos de encosta coincidem com as zonas classificadas como Incondicionalmente Instáveis. Resultado similar pode ser visto no trabalho de Prieto et al. (2017), uma vez que esse estudo também classificou áreas de risco de deslizamentos de encosta em Campos do Jordão, a partir da utilização do modelo matemático *Shalstab* e do mapeamento realizado pelo IG como forma de validar os resultados obtidos. Entretanto, diferentemente do trabalho de Prieto et al. (2017), o presente estudo buscou, além de identificar as áreas de suscetibilidade a escorregamentos, compreender quais são os elementos antrópicos presentes nas áreas de maior suscetibilidade.

Pode-se dizer que o modelo *Shalstab* é uma importante ferramenta a ser utilizada na análise e classificação de áreas de risco a deslizamentos. Todavia, é importante identificar como as variações dos diferentes parâmetros de entrada podem alterar a suscetibilidade das áreas.

A análise dos diferentes cenários permite identificar uma relação inversamente proporcional entre as áreas de instabilidade e a alteração dos parâmetros de ângulo de atrito interno (Figuras 4.10 e 4.11). Ou seja, com a diminuição do

valor desse parâmetro, há um aumento das áreas de instabilidade, conforme se observa nas Tabelas 4.8 e 4.9.

Tabela 4.8. Áreas de Suscetibilidade no bairro Britador variando o parâmetro de ângulo de atrito interno.

Estadísticas de Suscetibilidade à Deslizamentos - Britador			
Classes	Porcentagem (%) Cenário 1 $\Phi=30^\circ \rho_s=1600\text{kpa}$ $z=0,5\text{m } c'=1000\text{N/m}^2$	Porcentagem (%) Cenário 2 $\Phi=33^\circ \rho_s=1600\text{kpa}$ $z=0,5\text{m } c'=1000\text{N/m}^2$	Porcentagem (%) Cenário 3 $\Phi=35^\circ \rho_s=1600\text{kpa}$ $z=0,5\text{m } c'=1000\text{N/m}^2$
Incondicionalmente Instável	0.45	0.25	0.15
< -3,1	0.72	0.3	0.2
- 3,1 - -2,8	2.2	1.15	0.83
-2,8 - -2,5	6.16	4.54	3.53
-2,5 - -2,2	10.01	9.55	8.71
> -2,2	10	10.36	10.33
Incondicionalmente Estável	70.46	73.86	76.35

Tabela 4.9. Áreas de Suscetibilidade na Vila Albertina variando o parâmetro de ângulo de atrito interno.

Estadísticas de Suscetibilidade à Deslizamentos - Vila Albertina			
Classes	Porcentagem (%) Cenário 1 $\Phi=30^\circ \rho_s=1600\text{kpa}$ $z=0,5\text{m } c'=1000\text{N/m}^2$	Porcentagem (%) Cenário 2 $\Phi=33^\circ \rho_s=1600\text{kpa}$ $z=0,5\text{m } c'=1000\text{N/m}^2$	Porcentagem (%) Cenário 3 $\Phi=35^\circ \rho_s=1600\text{kpa}$ $z=0,5\text{m } c'=1000\text{N/m}^2$
Incondicionalmente Instável	0.01	0	0
< -3,1	0.52	0.2	0.15
- 3,1 - -2,8	1.59	0.7	0.41
-2,8 - -2,5	6.81	4.24	2.99
-2,5 - -2,2	12.48	10.69	9.06
> -2,2	10.1	9.88	9.58
Incondicionalmente Estável	68.5	74.29	77.82

Cabe ressaltar que na análise das tabelas, é importante sempre verificar a classe Incondicionalmente Estável, realçada pelo tom laranja, pois é a classe que nos permite quantificar o aumento ou diminuição das áreas de instabilidade. Considerando tão somente a classe Incondicionalmente Instável, é possível que erros de interpretação sejam feitos. Para exemplificar, observa-se que na Tabela 4.9, a porcentagem de áreas classificadas como

Incondicionalmente Instáveis é praticamente nula, e isso pode levar a uma interpretação errônea de que a variação do ângulo de atrito interno pouco influencia na instabilidade da área. Entretanto, ao analisar a classe Incondicionalmente Estável, é comprovado através da variação da porcentagem de áreas consideradas como estáveis, que esse parâmetro tem grande influência na suscetibilidade de uma região.

Os cenários 1, 7 e 8, os quais mostram variações no valor da coesão, também apresentaram divergências na proporção de áreas de instabilidade, conforme Tabelas 4.10 e 4.11.

Tabela 4.10. Áreas de Suscetibilidade no bairro Britador variando o parâmetro de coesão.

Estadísticas de Suscetibilidade à Deslizamentos - Britador			
Classes	Porcentagem (%) Cenário 1 $\Phi=30^\circ$ $\rho_s=1600\text{kpa}$ $z=0,5\text{m}$ $c'=1000\text{N/m}^2$	Porcentagem (%) Cenário 8 $\Phi=30^\circ$ $\rho_s=1600\text{kpa}$ $z=0,5\text{m}$ $c'=1500\text{N/m}^2$	Porcentagem (%) Cenário 9 $\Phi=30^\circ$ $\rho_s=1600\text{kpa}$ $z=0,5\text{m}$ $c'=2000\text{N/m}^2$
Incondicionalmente Instável	0.45	0.15	0
< -3,1	0.72	0.15	0.01
- 3,1 - -2,8	2.2	0.65	0.11
-2,8 - -2,5	6.16	2.87	0.81
-2,5 - -2,2	10.01	7.71	3.43
> -2,2	10	9.62	5.73
Incondicionalmente Estável	70.46	78.85	89.91

Tabela 4.11. Áreas de Suscetibilidade na Vila Albertina variando o parâmetro de coesão.

Estadísticas de Suscetibilidade à Deslizamentos - Vila Albertina			
Classes	Porcentagem (%) Cenário 1 $\Phi=30^\circ$ $\rho_s=1600\text{kpa}$ $z=0,5\text{m}$ $c'=1000\text{N/m}^2$	Porcentagem (%) Cenário 8 $\Phi=30^\circ$ $\rho_s=1600\text{kpa}$ $z=0,5\text{m}$ $c'=1500\text{N/m}^2$	Porcentagem (%) Cenário 9 $\Phi=30^\circ$ $\rho_s=1600\text{kpa}$ $z=0,5\text{m}$ $c'=2000\text{N/m}^2$
Incondicionalmente Instável	0.01	0	0
< -3,1	0.52	0.1	0.01
- 3,1 - -2,8	1.59	0.27	0.03
-2,8 - -2,5	6.81	2.3	0.32
-2,5 - -2,2	12.48	7.71	2.32
> -2,2	10.1	8.91	4.54
Incondicionalmente Estável	68.5	80.7	92.77

A partir da análise dos valores apresentados nas Tabelas 4.10 e 4.11, constata-se que quanto maior a coesão do solo, menor a instabilidade na área. Em outras palavras, solos mais coesos favorecem a estabilidade da área. Por outro lado, ao analisar a profundidade do solo, verifica-se que solos rasos apresentam maior estabilidade do que solos mais profundos (Tabelas 4.12 e 4.13).

Tabela 4.12. Áreas de Suscetibilidade no bairro Britador variando o parâmetro de profundidade do solo.

Estadísticas de Suscetibilidade à Deslizamentos - Britador			
Classes	Porcentagem (%) Cenário 1 $\Phi=30^\circ \rho_s=1600\text{kpa}$ $z=0,5\text{m } c'=1000\text{N/m}^2$	Porcentagem (%) Cenário 6 $\Phi=30^\circ \rho_s=1600\text{kpa}$ $z=1,0\text{m } c'=1000\text{N/m}^2$	Porcentagem (%) Cenário 7 $\Phi=30^\circ \rho_s=1600\text{kpa}$ $z=2,0\text{m } c'=1000\text{N/m}^2$
Incondicionalmente Instável	0.45	2.09	4.62
< -3,1	0.72	3.11	4.17
- 3,1 - -2,8	2.2	4.56	5.58
-2,8 - -2,5	6.16	9.06	10.48
-2,5 - -2,2	10.01	11.25	11.36
> -2,2	10	9.4	9.45
Incondicionalmente Estável	70.46	60.53	54.33

Tabela 4.13. Áreas de Suscetibilidade na Vila Albertina variando o parâmetro de profundidade do solo.

Estadísticas de Suscetibilidade à Deslizamentos - Vila Albertina			
Classes	Porcentagem (%) Cenário 1 $\Phi=30^\circ \rho_s=1600\text{kpa}$ $z=0,5\text{m } c'=1000\text{N/m}^2$	Porcentagem (%) Cenário 6 $\Phi=30^\circ \rho_s=1600\text{kpa}$ $z=1,0\text{m } c'=1000\text{N/m}^2$	Porcentagem (%) Cenário 7 $\Phi=30^\circ \rho_s=1600\text{kpa}$ $z=2,0\text{m } c'=1000\text{N/m}^2$
Incondicionalmente Instável	0.01	1	3.07
< -3,1	0.52	2.34	3.29
- 3,1 - -2,8	1.59	4.93	6.94
-2,8 - -2,5	6.81	12.07	14.59
-2,5 - -2,2	12.48	14.62	14.68
> -2,2	10.1	10.2	10.75
Incondicionalmente Estável	68.5	54.83	46.69

Pela análise das Tabelas 4.12 e 4.13 verifica-se que a profundidade do solo é um dos principais parâmetros causadores dos deslizamentos. No estudo realizado na Vila Albertina, notou-se que em profundidades de 2 metros

(cenário 7), há uma diminuição de 31% das áreas consideradas como estáveis no cenário 1, cuja profundidade era de apenas 0.5 metros. Já para o bairro do Britador, há uma diminuição de 23% das áreas estáveis.

Resultados similares foram encontrados nos estudos de Vieira e Ramos (2015), Michel et al. (2014) e Prieto et al. (2017). Ressalta-se que o modelo matemático *Shalstab*, conforme explicado anteriormente no capítulo 2, item 2.4, considera apenas os escorregamentos superficiais. E, de acordo com Mendes e Filho (2015), a superfície de ruptura da área de estudo ocorre em aproximadamente 1,5 metros de profundidade. Assim sendo, neste trabalho, a profundidade máxima do solo utilizada como parâmetros de entrada, é de 2 metros.

Para os dois bairros em estudo, os cenários que apresentaram mais áreas instáveis, foram os cenários 6 e 7. E os que apresentaram maior estabilidade foram os cenários 8 e 9. Com isso, podemos inferir que a profundidade do solo e a coesão do mesmo, são os principais parâmetros físicos que mais alteram a suscetibilidade de uma área. As Tabelas 4.14 e 4.15 trazem o compilado de todos os resultados estatísticos, a fim de facilitar a identificação dos melhores e piores cenários, marcados com as cores verde e vermelho, respectivamente.

Tabela 4.14. Estatísticas de suscetibilidade da Vila Albertina.

Classes	% Cenário 1	% Cenário 2	% Cenário 3	% Cenário 4	% Cenário 5	% Cenário 6	% Cenário 7	% Cenário 8	% Cenário 9	% Cenário 10
Inc. Instável	0,01	0	0	0,01	0,09	1	3,07	0	0	0
< -3,1	0,52	0,2	0,15	0,6	0,56	2,34	3,29	0,1	0,01	0,43
- 3,1 - -2,8	1,59	0,7	0,41	1,5	1,33	4,93	6,94	0,27	0,03	1,27
-2,8 - -2,5	6,81	4,24	2,99	6,44	5,45	12,07	14,59	2,3	0,32	5,82
-2,5 - -2,2	12,48	10,69	9,06	12,17	10,17	14,62	14,68	7,71	2,32	11,6
> -2,2	10,1	9,88	9,58	10,31	8,12	10,2	10,75	8,91	4,54	10,06
Inc. Estável	68,5	74,29	77,82	68,96	74,29	54,83	46,69	80,7	92,77	70,82

Tabela 4.15. Estatísticas de suscetibilidade do bairro Britador.

Classes	% Cenário 1	% Cenário 2	% Cenário 3	% Cenário 4	% Cenário 5	% Cenário 6	% Cenário 7	% Cenário 8	% Cenário 9	% Cenário 10
Inc. Instável	0,45	0,25	0,15	0,5	0,59	2,09	4,62	0,15	0	0,39
< -3,1	0,72	0,3	0,2	0,75	0,69	3,11	4,17	0,15	0,01	0,58
-3,1 - -2,8	2,2	1,15	0,83	2,19	2,11	4,56	5,58	0,65	0,11	1,84
-2,8 - -2,5	6,16	4,54	3,53	5,95	5,45	9,06	10,48	2,87	0,81	5,6
-2,5 - -2,2	10,01	9,55	8,71	9,64	8,72	11,25	11,36	7,71	3,43	9,7
> -2,2	10	10,36	10,33	10,19	8,58	9,4	9,45	9,62	5,73	10,17
Inc. Estável	70,46	73,86	76,35	70,79	73,86	60,53	54,33	78,85	89,91	71,72

Do acima exposto entende-se que os principais fatores físicos para a instabilidade da área, são a profundidade do solo e a coesão. 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, 2017, MENDES et al. 2018a,b).

Para uma identificação e análise final das principais áreas consideradas como Incondicionalmente Instáveis, realizou-se a sobreposição dos resultados gerados pelos 10 cenários de cada bairro em estudo. Essa sobreposição foi realizada no *software* Arcgis, de modo com que cada mapa proveniente do *Shalstab*, fosse representado com transparência de 50%. Desta forma é possível mapear as zonas mais instáveis e que necessitam de constante monitoramento das encostas. Tais resultados são apresentados nas Figuras 4.20 e 4.21.

Figura 4.20. Zonas de maior instabilidade de encosta na Vila Albertina.

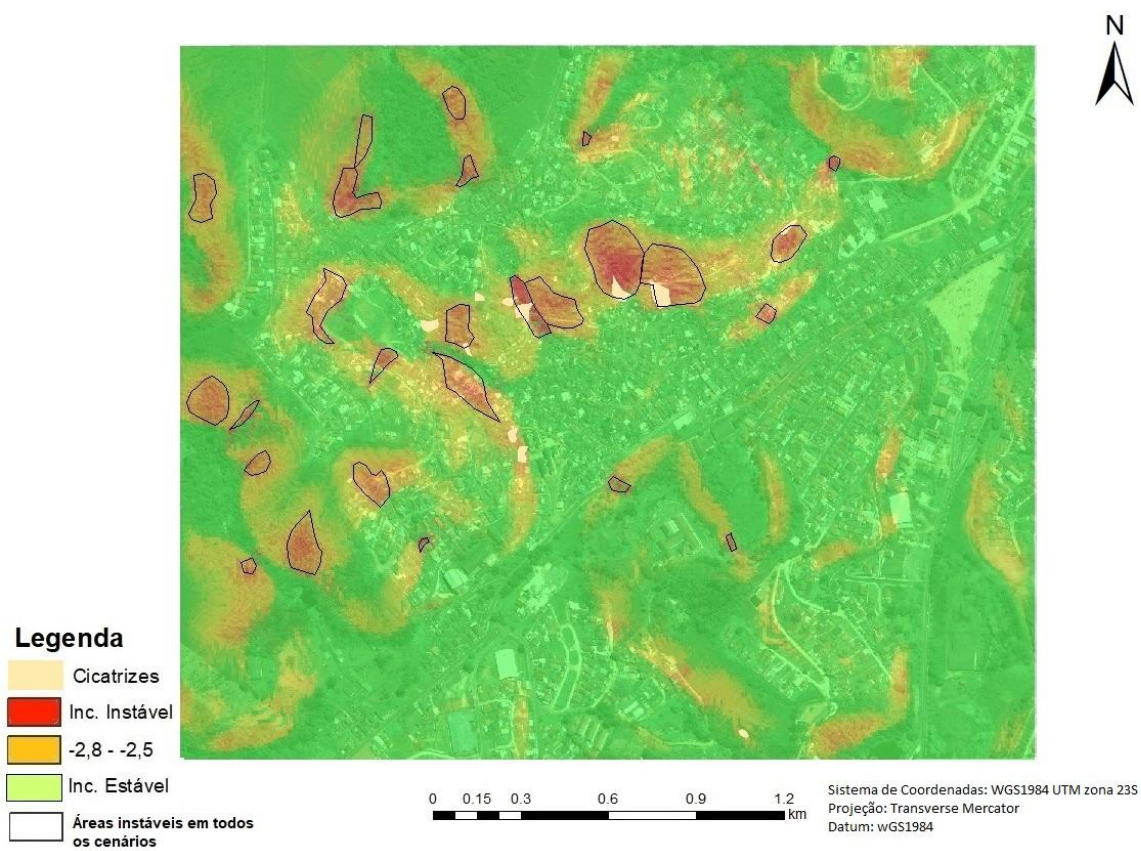
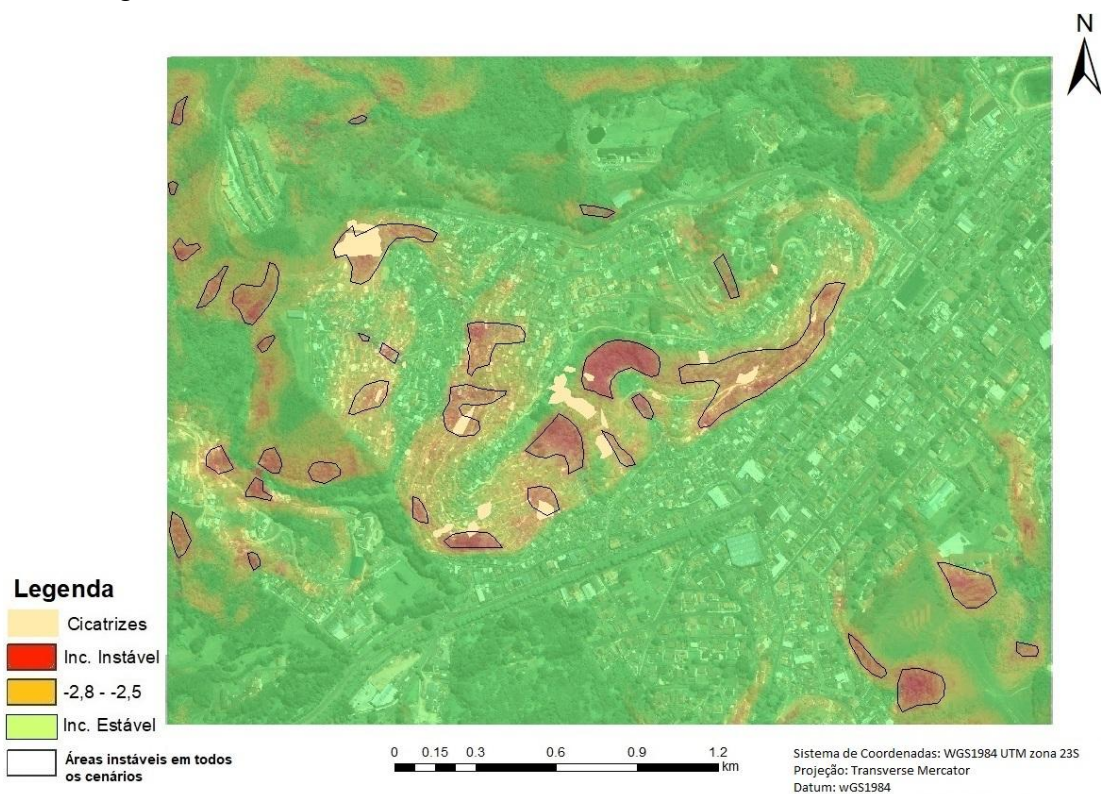


Figura 4.21. Zonas de maior instabilidade de encosta no bairro Britador.



As Figuras 4.20 e 4.21 identificam as áreas classificadas como Incondicionalmente Instáveis pelo modelo *Shalstab*, independentemente dos valores adotados nos parâmetros de entrada. Ou seja, são as áreas identificadas nos 10 cenários executados, com a maior probabilidade de ocorrência de deslizamentos. A imagem do sensor orbital WorldView-2 permite uma melhor identificação visual da localização dessas áreas suscetíveis à ocorrência de deslizamentos, conforme observa-se nas Figuras 4.22 e 4.23.

Figura 4.22. Mapeamento das áreas de maior suscetibilidade à deslizamentos na Vila Albertina.

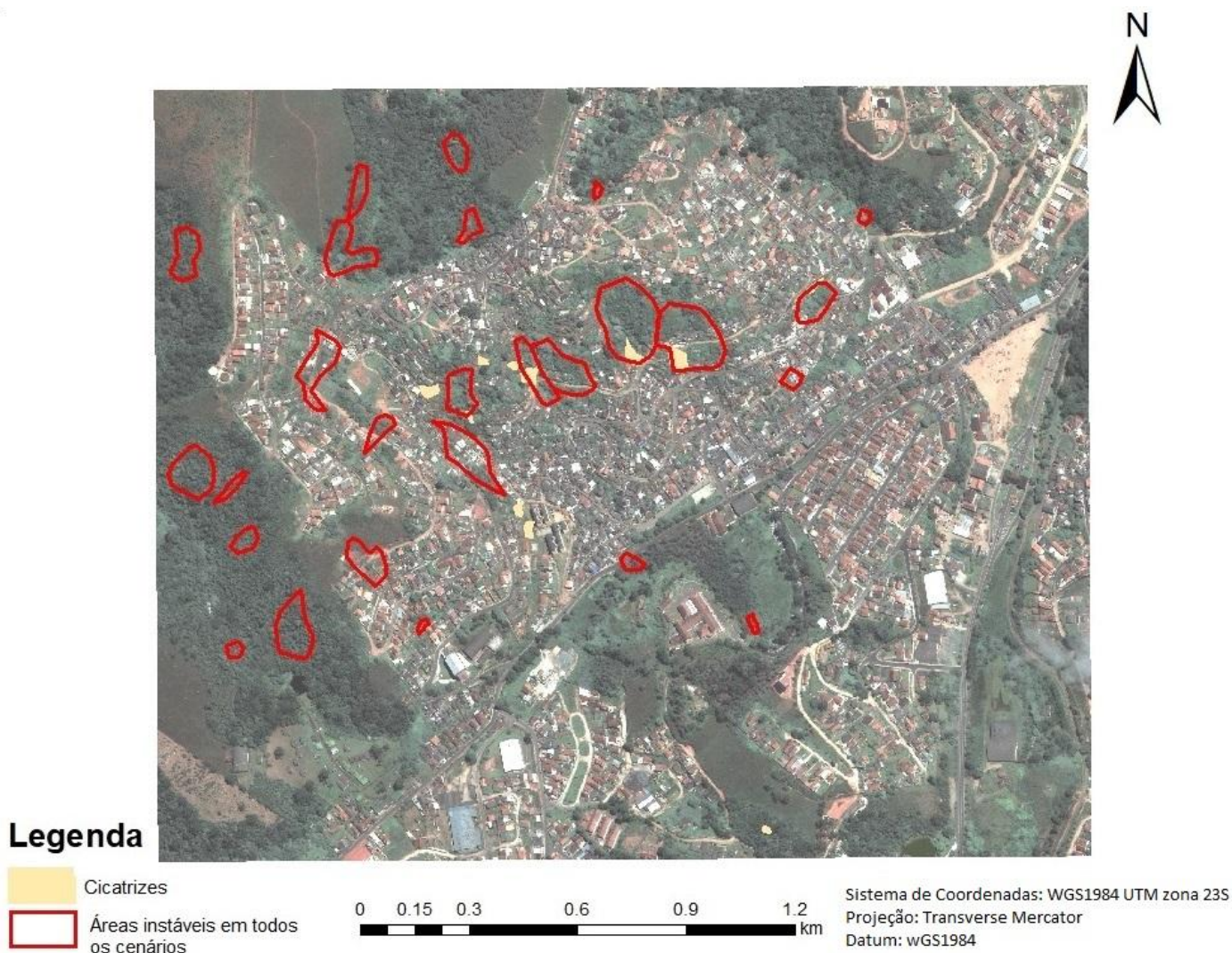
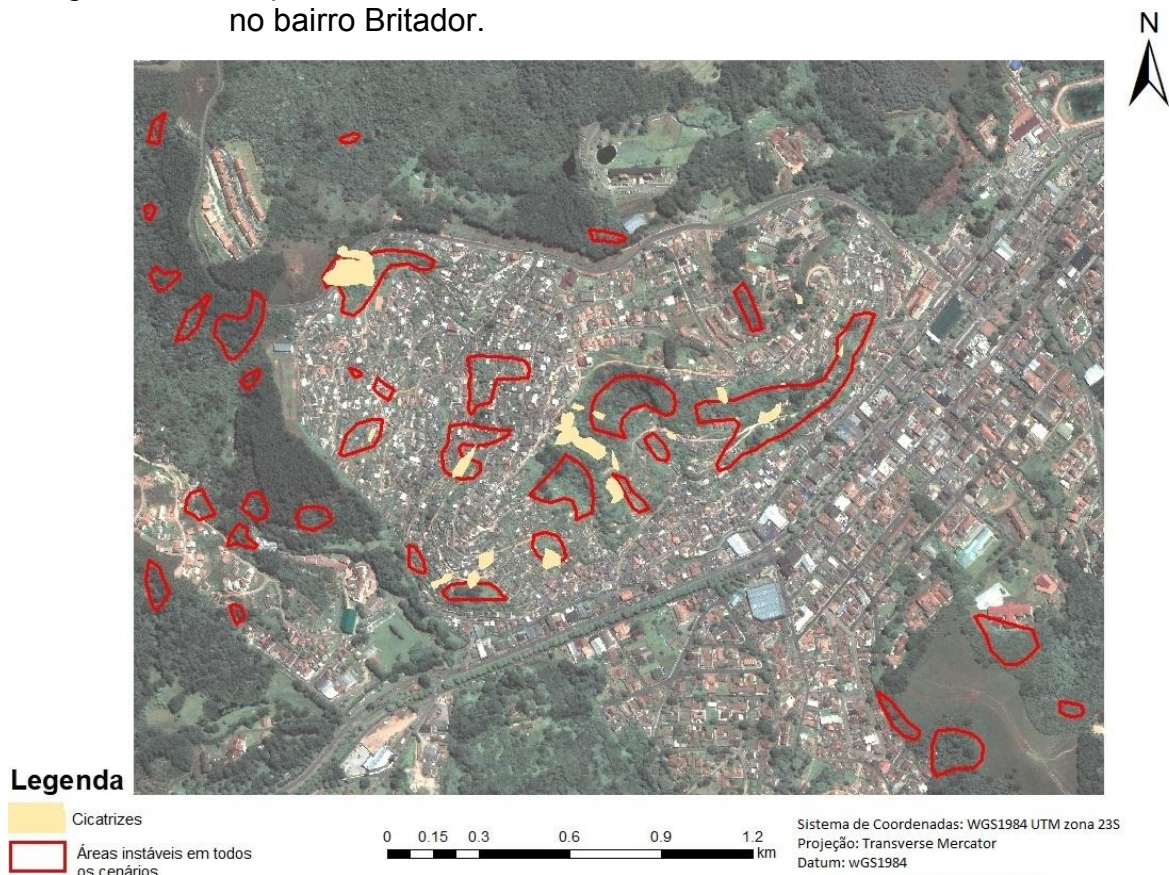


Figura 4.23. Mapeamento das áreas de maior suscetibilidade à deslizamentos no bairro Britador.



A partir das Figuras 4.20 e 4.2, foi contabilizado a porcentagem de cicatrizes de deslizamento para cada classe de estabilidade do *Shalstab*. Na Vila Albertina, 40% das cicatrizes identificadas encontram-se na classe Incondicionalmente Instáveis, enquanto os outros 60% estão distribuídos pelas classes intermediárias, conforme observado na Tabela 4.16.

Tabela 4.16. Estatística de cicatrizes da Vila Albertina por classe do *Shalstab*.

Classes	Porcentagem de Cicatrizes
Inc. Instável	40%
< -3,1	20%
-3,1 - -2,8	20%
-2,8 - -2,5	10%
-2,5 - -2,2	0%
> -2,2	10%
Inc. Estável	0%

Já no bairro Britador, mais de 60% das cicatrizes mapeadas estão localizadas nas classes intermediárias, sendo que apenas 7,14% estão em áreas Incondicionalmente Instáveis, conforme Tabela 4.17.

Tabela 4.17. Estatísticas de cicatrizes no bairro Britador por classes do *Shalstab*.

Classes	Porcentagem de Cicatrizes
Inc. Instável	7,14%
< -3,1	30,95%
-3,1 - -2,8	33,30%
-2,8 - -2,5	13,63%
-2,5 - -2,2	12%
> -2,2	3%
Inc. Estável	0%

E pela análise das Figuras 4.22 e 4.23, 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 a 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.

Estes resultados mostram quais são as áreas consideradas mais perigosas para a ocupação humana, uma vez que são as mais suscetíveis à ocorrência de deslizamentos. Entretanto, são áreas que já apresentam ocupação humana irregular, conforme visto nas Figuras 4.22 e 4.23, e por isso merecem a maior atenção dos órgãos públicos e da defesa civil a fim de evitar fatalidades.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A imagem de satélite do sensor orbital WorldView-2 trouxe grande contribuição para o estudo, pois através da classificação das áreas em estudo, facilitou a identificação das áreas urbanas, da presença ou ausência de vegetação, vias pavimentadas e o tipo de cobertura das construções (cobertura cerâmica ou outra). Com isso, identificou-se que as construções irregulares e de baixo padrão, encontram-se nas áreas de encostas e zonas de maior declividade. A imagem de alta resolução espacial permitiu a identificação e análise dos principais fatores antrópicos que favorecem os deslizamentos. Cortes verticais em taludes, retirada da vegetação, acúmulo de lixo, falta de drenagem adequada, excesso de construções nas encostas, etc., são os principais elementos observados durante o trabalho de campo, e que alteram a suscetibilidade da área.

A utilização do modelo matemático *Shalstab* se mostrou eficaz na análise, identificação e classificação das áreas de instabilidade de encosta. Os resultados referentes às áreas de maior Instabilidade são condizentes com as cicatrizes de deslizamento mapeadas, com os resultados provenientes de outros estudos, e também com as áreas de maior declividade. Outros fatores preponderantes para a ocorrência de deslizamentos relacionam-se com os parâmetros de profundidade do solo e coesão. Entretanto, fatores antrópicos como ocupações irregulares em áreas de declividade acentuada, cortes verticais nas encostas, falta de drenagem, construções precárias, degradação ambiental, acúmulo de lixo e excesso de peso nas áreas de maior declividade, são os principais elementos que ocasionam a ruptura do solo, levando a deslizamentos, desmoronamentos de casa e conseqüentemente tragédias sociais. As ações das chuvas apenas aceleram a desestabilização dos solos, devido ao acesso de umidade no mesmo. Cabe, portanto, aos órgãos governamentais o monitoramento e proibição das ocupações em áreas de risco. Para tal, é preciso também que seja oferecido locais apropriados para a construção de moradias, para pessoas com baixo poder aquisitivo.

Algumas ressalvas com relação ao modelo matemático precisam ser feitas: a utilização do *Shalstab* é feita através da plataforma *ArcView* 3.0, sendo que o *software* já encontra-se na versão 10.6. Recomenda-se uma atualização da compatibilidade do modelo matemático, com as versões mais atuais dos *softwares* de SIG (Sistema de Informação Geográfica). Outro item importante a se destacar é o fato que o *Shalstab* analisa exclusivamente os parâmetros físicos do solo, sem considerar as alterações antrópicas. Ou seja, a forma como ocorre a ocupação humana desordenada e irregular em áreas suscetíveis a deslizamentos não entra na análise do modelo, mesmo que estes sejam um dos principais elementos que favorecem os escorregamentos. Ressalta-se ainda, que o modelo *Shalstab* só consegue identificar áreas suscetíveis a sofrer com escorregamentos superficiais, não identificando escorregamentos rotacionais e profundos.

Como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se realizar a coleta de solo da área de estudo e executar análises geotécnicas, visando a obtenção mais precisa dos parâmetros de coesão, profundidade e densidade do solo. E a utilização de drones, para o mapeamento das áreas antes e após os deslizamentos, favorecendo uma análise bem detalhada das alterações sofridas na área, tanto pela ocupação humana, quanto pelos deslizamentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHRENDT, A. **Movimentos de massa gravitacionais** – proposta de um sistema de previsão: aplicação na área urbana de Campos do Jordão – SP. 2005. 390p. Tese (Doutorado em Geotecnia), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

ARAÚJO, E. H. G.; KUX, H. J. H.; FLORENZANO, T. G. Ortoretificação de imagens de satélite *QuickBird* para aplicações urbanas. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 2, n. 60, 2008. Disponível em: <<http://www.lsie.unb.br/rbc/index.php/rbc/article/view/42>>. Acesso em 12 dez. 2017.

BAATZ, M., SCHAPE, A., SCHÄPE, M. Multi resolution segmentation: an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. In: STROBL, J.; BLASCHKE, T.; GRIESEBNER, G. (Eds.), *Angewandte geographische informationsverarbeitung: XII Beiträge zum AGIT-Symposium Salzburg 2000*. [S.l.]: Herbert Wichmann Verlag, 2000, p.12–23.

BENTO, B. M. P. **Avaliação dos classificadores por árvores de decisão e árvores de regressão em cenas urbanas do sensor WorldView-2**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP. 2017. Disponível em: <<http://mtc-m21b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/10.24.18.16/doc/publicacao.pdf>>. Acesso em: 13 dez. 2017.

BINS, L.; FONSECA, L.; ERTHAL, G.; LI, F. Satellite imagery segmentation: a region growing approach. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 8, 1996. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1996. P.677-680. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/249829706_Satellite_Imagery_Segmentation_a_region_growing_approach>. Acesso em: 08 mar. 2017.

BRASIL, Decreto nº 12.651 de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa. **Diário Oficial da União**, Governo Federal, Brasília-DF. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/12651.htm>. Acesso em: 06 fev. 2018.

CARVALHO, M. V. A.; MALUF, V. B. V.; DAMASCO, F. S.; GOMES, I. S. L.; DIAS, L. S. M.; VICENS, R. S. Análise da expansão urbana na microrregião dos Lagos (RJ), através da integração entre GEOBIA e mineração de dados. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 17, 2015, João Pessoa. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2015. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p1284.pdf>>. Acesso em: 24 jan. 2017.

CARVALHO, M. V. A. **Classificação da cobertura e uso do solo com Imagens WorldView-2 utilizando mineração de dados e análise baseada em objetos.** Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP. 2011. Disponível em: < <http://mtc-m16d.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-19/2011/09.05.20.27/doc/publicacao.pdf>>. Acesso em: 24 jan. 2017.

CENAD – Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres. **Anuário brasileiro de desastres naturais:** 2012. Brasília: CENAD, 2013. Disponível em: < http://www.mi.gov.br/c/document_library/get_file?uuid=f22cccd-281a-4b72-84b3-654002cff1e6&groupId=185960>. Acesso em: 20 out. 2017.

CENTRO NACIONAL DE MONITORAMENTO E ALERTAS DE DESASTRES NATURAIS - CEMADEN. **Histórico da criação do CEMADEN.** Disponível em: <<http://www.cemaden.gov.br/historico-da-criacao-do-cemaden/>>. Acesso em: 24 jan. 2017.

COMITÊ DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DA SERRA DA MANTIQUEIRA – CBH-SM. **Relatório da situação dos recursos hídricos,** São Paulo, 2017. Disponível em: < <http://www.comitesm.sp.gov.br/institucional.php?k=ugrhi>>. Acesso em: 06 fev. 2018.

CHEN, G.; WENG, Q.; HAY, G. J.; HE, Y. Geographic Object-based Image Analysis (GEOBIA): emerging trends and future opportunities. **GIScience and Remote Sensing**, v.55, n.2, 2018. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/322367962>>. Acesso em: 05 fev. 2018.

CRUDEN, D. M.; VARNES, D. J. Landslides types and processes. In: TURNER, A.K.; SCHUSTER, R. L. (Eds.). **Landslides:** investigation and mitigation. Washington: Transportation Research Board Business Office, 1996. p. 36-75. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/269710355_CrudenDM_Varnes_DJ_1996_Landslide_Types_and_Processes_Special_Report_Transportation_Research_Board_National_Academy_of_Sciences_24736-75>. Acesso em: 03 jan. 2018.

DIETRICH, W. E.; MONTGOMERY, D. R. **SHALSTAB:** a digital terrain model for mapping shallow landslide potential. Corvallis: NCASI (National Council of the Paper Industry for Air and Stream Improvement), 1998, 29p. (Technical Report).

DIGITALGLOBE. **Satellite information.** Disponível em: <<https://www.digitalglobe.com/resources/satellite-information>>. Acesso em: 24 jan. 2017.

DRONOVA, I. Objected-based image analysis in wetland research: a review. **Remote Sensing Journal**, v. 7, 2015. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2072-4292/7/5/6380>>. Acesso em: 10 nov. 2016.

ECOGNITION. **Ecognition developer**. Disponível em: <<http://www.ecognition.com/suite/ecognition-developer>>. Acesso em: 30 jan. 2017

ENGESAT. **Ikonos**. Disponível em: < <http://www.engesat.com.br/imagens-de-satelite/ikonos/>>. Acesso em: 09 nov. 2016.

FAYYAD, U.; PIATETSKY-SHAPIRO, G.; SMYTH, P. From data mining to knowledge discovery in databases. **AI Magazine**, v.17, n.3, p.37-54, jul- 1996. Disponível em: < <http://www.csd.uwo.ca/faculty/ling/cs435/fayyad.pdf> >. Acesso em: 24 jan. 2017.

GALPARSORO, L. U.; FERNANDEZ, S. P. Medidas de concordância: el índice de *Kappa*. **CAD Aten Primaria**, v. 6, p. 169-171, 2001. Disponível em: <<https://www.fisterra.com/mbe/investiga/kappa/kappa2.pdf>>. Acesso em: 26 fev. 2018.

GOLDSCHMIDT, R.; PASSOS, E. **Data mining: um guia prático**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2005. 257 p.

HAN, J.; KAMBER, M.; PEI, J. **Data Mining: Concepts and Techniques**. 3.ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

HAY, G. J.; CASTILLA, G. Object-based image analysis: strengths, weakness, opportunities and threats (SWOT). In: **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v.26, n.4, 2006. Disponível em: < http://www.isprs.org/proceedings/xxxvi/4-c42/Papers/OBIA2006_Hay_Castilla.pdf>. Acesso em: 07 nov. 2016.

HIRUMA, S. T. **Neotectônica no planalto de Campos do Jordão**. 1999.106p. Dissertação (Mestrado em Geologia Sedimentar) - Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo,1999. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/34283968_Neotectonica_no_planalto_de_Campos_do_Jordao_SP >. Acesso em: 24 jan. 2017.

HIRUMA, S. T.; RICCOMINI, C.; MODENESI-GAUTTIERI, M. C. Neotectônica no planalto de Campos do Jordão. **Revista Brasileira de Geociências**, v.31, p. 375-384, 2001. Disponível em: <https://www.academia.edu/11510936/Neotect%C3%B4nica_no_planalto_de_Campos_do_Jord%C3%A3o_SP_ >. Acesso em: 24 jan. 2017.

HIRUMA, S. T.; RICCOMINI, C. Análise morfométrica em neotectônica: o exemplo do planalto de Campos do Jordão – SP. **Revista do Instituto Geológico - IG**, v. 20, p. 5-19, 1999. Disponível em:

<<http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/rig/article/view/8874> >. Acesso em: 12 jun. 2017

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Cidades e estados do Brasil** Disponível em:

<<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=350970>>. Acesso em: 13 out. 2016.

INSTITUTO GEOLÓGICO – IG. **Mapeamento de riscos associados a escorregamentos, inundações, erosões e solapamentos de margens: relatório técnico** - Município de Campos do Jordão. São Paulo: IG, 2014 - 16 p. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/project/Mapeamento-de-riscos-associados-a-escorregamentos-inundacoes-erosao-solapamento-de-margens-de-drenagens-do-municipio-de-Campos-do-Jordao-SP>>. Acesso em: 24 jan. 2018.

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, Porto Alegre. **Anais...** 2010. Disponível em: <www.agb.org.br/evento/download.php?idTrabalho=3109 >. Acesso em: 24 jan. 2017.

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

KAPPES, R. **Determinación de zonas de amenaza para la cadena volcánica Osorno-Puntiagudo y complejo Antillanca**. Chile: Oficina Nacional de Emergencia del Ministro del Interior – ONEMI, 2012. Disponível em: <<http://repositoriodigitalonemi.cl/web/handle/2012/1140> >. Acesso em: 08 jan. 2017.

KOBIYAMA, M.; MENDONÇA, M.; MORENO, D. A.; MARCELINO, I. P. V. O.; MARCELINO, E. V.; GONÇALVES, E. F.; BRAZETTI, L. L. P.; GOERL, R. F.; MOLLERI, G. S. F.; RUDORFF, F. M. **Prevenção de desastres naturais: conceitos básicos**. Curitiba: Organic Trading, 2006. Disponível em: <http://www.disaster-info.net/lideres/portugues/curso-brasil08/documentos_e_artigos/Prevencao%20desastres%20naturais.pdf>. Acesso em: 24 jan. 2017.

KORTING, T.S. **GeoDMA a tool integrating data mining with objected-based and multi-temporal analysis of satellite remotely sense imagery**. 2012. 97p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2012. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/teses/tese_thales.pdf >. Acesso em: 12 nov. 2016.

KORTING, T. S.; FONSECA, L. M. G.; CAMARA, G. GeoDMA-geographic data mining analyst. **Computer and Geosciences**, v. 57, p. 133-145, 2013.

Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098300413000538>>.

Acesso em: 09 nov. 2016.

KORTING, T. S., FONSECA, L. M. G., CAMARA, G. A geographical approach to self-organizing maps algorithm applied to image segmentation. **Lecture Notes in Computer Science**, v. 6915, p.162–170, 2011. Disponível em:

<https://www.researchgate.net/profile/Thales_Koerting/publication/220785373_A_Geographical_Approach_to_Self-Organizing_Maps_Algorithm_Applied_to_Image_Segmentation/links/54bf8bb10cf2acf661ce0fab/A-Geographical-Approach-to-Self-Organizing-Maps-Algorithm-Applied-to-Image-Segmentation.pdf>. Acesso em: 25 set. 2016.

MENDES, R. M.; VALERIO FILHO, M. V. 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**, v.7, p. 140-159, 2015. Disponível em: <http://file.scirp.org/pdf/ENG_2015032616204944.pdf>. Acesso em: 14 dez. 2017.

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 - An International Journal**, v. 36, n.1, fev 2018. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10706-017-0303-z>>. Acesso em: 07 fev. 2018.

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**, v. 18, p. 15-30, jan. 2018. Disponível em: <<https://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/18/15/2018/nhess-18-15-2018.pdf>>. Acesso em: 07 fev. 2018.

MENEGHETTI, G. T.; KUX, H. J. H. Mapeamento da cobertura da terra do município de Raposa (MA) utilizando imagens WorldView-2, o aplicativo interimage e mineração de dados. **Revista Brasileira de Cartografia**, v.66, p. 365-377, 2014. Disponível em: <<http://mtc-m21b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21b/2014/07.03.12.13/doc/Meneghetti,%20G.T.%20e%20Kux,%20H.J.H.,RB%20C%20%202014.pdf>>. Acesso em: 24 jan. 2017.

MICHEL, G. P.; KOBAYAMA, 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. Foz do Iguaçu – PR, **Anais...**,

2012. Disponível em: <<http://www.labhidro.ufsc.br/Artigos/ENES161.pdf>>. Acesso em: 24 jan. 2017.

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**, v.14, n.7, p.1266-1277, 2014. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/262771609_Comparative_analysis_of_SHALSTAB_and_SINMAP_for_landslide_susceptibility_mapping_in_the_Cunha_River_basin_southern_Brazil>. Acesso em: 10 out. 2017.

MODENESI-GAUTTIERI, M. C.; HIRUMA, S. T.; RICCOMINI, C. Morphotectonics of a high plateau on the northwestern flank of the Continental Rift of Southeastern, Brazil. **Geomorphology**, v. 43, p. 257-271, 2002. Disponível em: <<http://www.neotectonica.ufpr.br/morfotectonica/plato.pdf>>. Acesso em: 24 jan. 2017.

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 a 28, 2004. Disponível em: <<http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/rig/article/viewFile/8900/8166>>. Acesso em: 24 jan. 2017.

NETO, L. A.; BRÁULIO, N.; SALLES, T.; MOURA, G.; ALMEIDA, C.; KOIKE, K. (coords.). **Plano municipal de redução de risco**. Brasília: Ministério das Cidades, 2006.

NOVACK, T. **Classificação da cobertura da terra e do uso do solo urbano utilizando o sistema InterIMAGE e imagens do sensor QuickBird**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). 2009. 216p. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009. Disponível em: <<http://wiki.dpi.inpe.br/lib/exe/fetch.php?media=interimage:novack2009classificacao.pdf>>. Acesso em: 13 dez. 2017.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto – princípios e aplicações**. 4 ed. São Paulo: BLUCHER, 2010. 288 p.

O'LOUGHLIN, G. H. Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis. **Water Resource Research**, v. 22, n. 5, p. 794-804, 1986. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/WR022i005p00794/pdf>>. Acesso em: 29 jan. 2018.

PESK, V. A.; DISPERATI, A. A.; SANTOS, J. R. Comparação de técnicas de fusão aplicadas à imagens Quickbird-2. **Floresta e Ambiente**, v. 18, p. 127-134, 2011. Disponível em: <<http://www.floram.org/files/v18n2/v18n2a2.pdf>>. Acesso em: 17 ago. 2017.

PINHO, C. M. D.; FEITOSA, F. F.; KUX, H. J. H. Classificação automática de cobertura do solo urbano em imagem IKONOS: comparação entre a abordagem pixel-a-pixel e orientada a objetos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12. 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.19.17.58/doc/4217.pdf>>. Acesso em: 24 jan. 2017.

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**, v. 33, n. 19, p. 5973-5995, 2012. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/254314186_Land-cover_classification_of_an_intra-urban_environment_using_high-resolution_images_and_object-based_image_analysis>. Acesso em: 24 jan. 2017.

POLIZEL, S. P.; MARQUES, M. L.; COSTA, N. R.; ROSSI, E.; FERREIRA, M. V. Aplicação e avaliação de técnicas de fusão em imagens IKONOS e GeoEye. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15. 2001. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/266294044_Aplicacao_e_avaliacao_de_tecnicas_de_fusao_em_imagens_ikonos_e_GeoEye>. Acesso em: 19 nov. 2016.

PU, R.; LANDRY, S. A comparative analysis of high spatial resolution IKONOS and WorldView-2 imagery for mapping urban tree species. **Remote Sensing of Environment**, v. 125, p. 516-533, 2012. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425712002477>>. Acesso em: 15 jan. 2017.

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**, v.1, n.69, p.71-87, 2017. Disponível em: <<http://www.lsie.unb.br/rbc/index.php/rbc/article/viewFile/1349/1079>>. Acesso em: 14 dez. 2017.

REGINATTO, G. M. P.; MACCARINI, M.; KOBAYAMA, M.; HIGASHI, R. A. R.; GRANDO, A.; CORSEUIL, C. W.; CARAMAZ, M. L. *SHALSTAB* application to identify the susceptible areas of shallow landslides in Cunha river watershed, Rio dos Cedros city, SC, Brazil. In: GEOBIA, 4. 2012, Rio de Janeiro – Brazil. **Proceedings...** 2012. p. 108. Disponível em: <http://www.labhidro.ufsc.br/Artigos/034_Geobia-1.pdf>. Acesso em: 24 jan. 2017.

RODRIGUES, T. C. S. **Classificação da cobertura e do uso da terra com imagens WorldView-2 de setores nortes da ilha do Maranhão por meio do aplicativo interIMAGE e de mineração de dados.** 2014. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP. 2014. Disponível em: <<http://mtc-m21b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21b/2014/03.31.19.30.37/doc/publicacao.pdf?ibiurl.language=en>>. Acesso em: 12 nov. 2017.

ROSS, J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais antropizados. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. 8, p. 63-74, 1994. Disponível em: <<http://www.revistas.usp.br/rdg/article/view/47327/51063>>. Acesso em: 15 out 2017.

SANTOS, C. S.; CASTRO C. M. S.; RIBEIRO, T. R. Aplicações de imagens de satélite de alta resolução no planejamento urbano: o caso do cadastro técnico multifinalitário de Mata de São João, Bahia. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15. 2011, Curitiba. **Anais...**, São José dos Campos: INPE, 2011. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2011/files/p1683.pdf> >. Acesso em: 24 jan. 2017.

TOBIN, G. A; WHITEFORD, L. M. "Provisioning capacity: a critical component of vulnerability and resilience under chronic volcanic eruptions." In: PFEIFER, K.; PFEIFER, N. (Eds..) **Forces of nature and cultural responses.** New York: Springer, 2012. p.139-166. Disponível em: <http://scholarcommons.usf.edu/geo_facpub/48/ >. Acesso em: 12 ago. 2016.

TOPODATA. **Mapa índice.** Disponível em: <<http://www.webmapit.com.br/inpe/topodata/>>. Acesso em: 09 set. 2017.

TOUTIN, T. Review article: geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods. **International Journal of Remote Sensing**, v.25, n. 10, p. 1893-1924, May, 2004. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/0143116031000101611>>. Acesso em: 28 dez. 2017.

VALERIANO, M. M. Modelo digital de variáveis morfológicas com dados SRTM para o território nacional: o projeto TOPODATA. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12. 2005, Goiânia, GO. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p.1-8. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/10.29.11.41/doc/3595.pdf>>. Acesso em: 22 jan. 2018.

VARGAS, M.; PICHLER, E. Residual soil and rock slides in Santos (Brazil). **International Conference for Soil Mechanics and Found Engineering - Londres**, v.2, p. 394-398, 1957. Disponível em:

<https://www.issmge.org/uploads/publications/1/41/1957_02_0077.pdf>.
Acesso em: 03 jan. 2018.

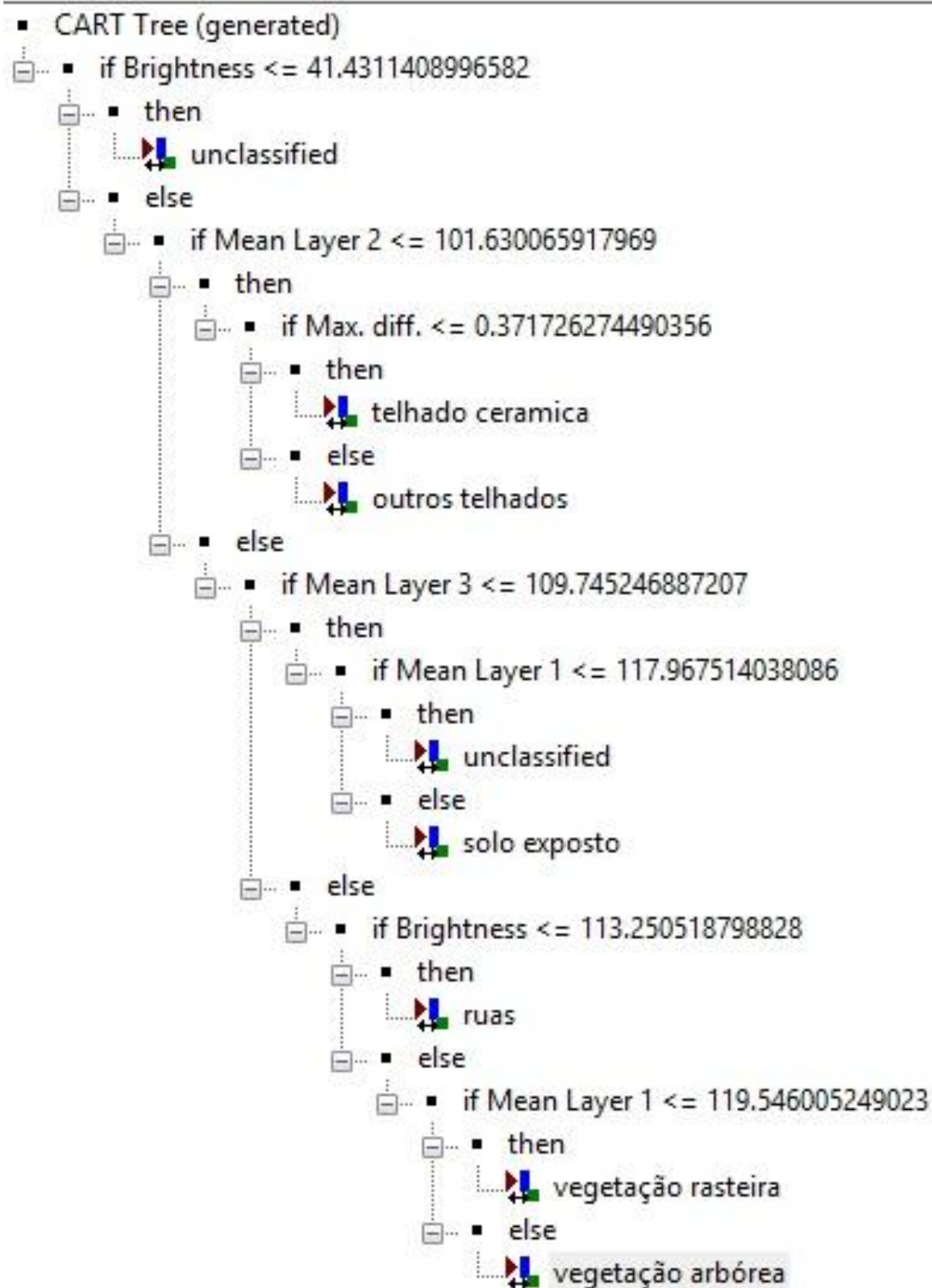
VIEIRA, B. C.; RAMOS, H. Aplicação do Modelo SHASLTAB para Mapeamento da Susceptibilidade a Escorregamentos Rasos em Caraguatatuba, Serra do Mar (SP). **Revista Departamento de Geografia – USP**, v. 29, p. 161-174, 2015. Disponível em:

<https://www.researchgate.net/publication/282186788_Aplicacao_do_modelo_Shalstab_para_mapeamento_da_suscetibilidade_a_escorregamentos_rasos_em_Caraguatatuba_Serra_do_Mar_SP>. Acesso em: 24 jan. 2017.

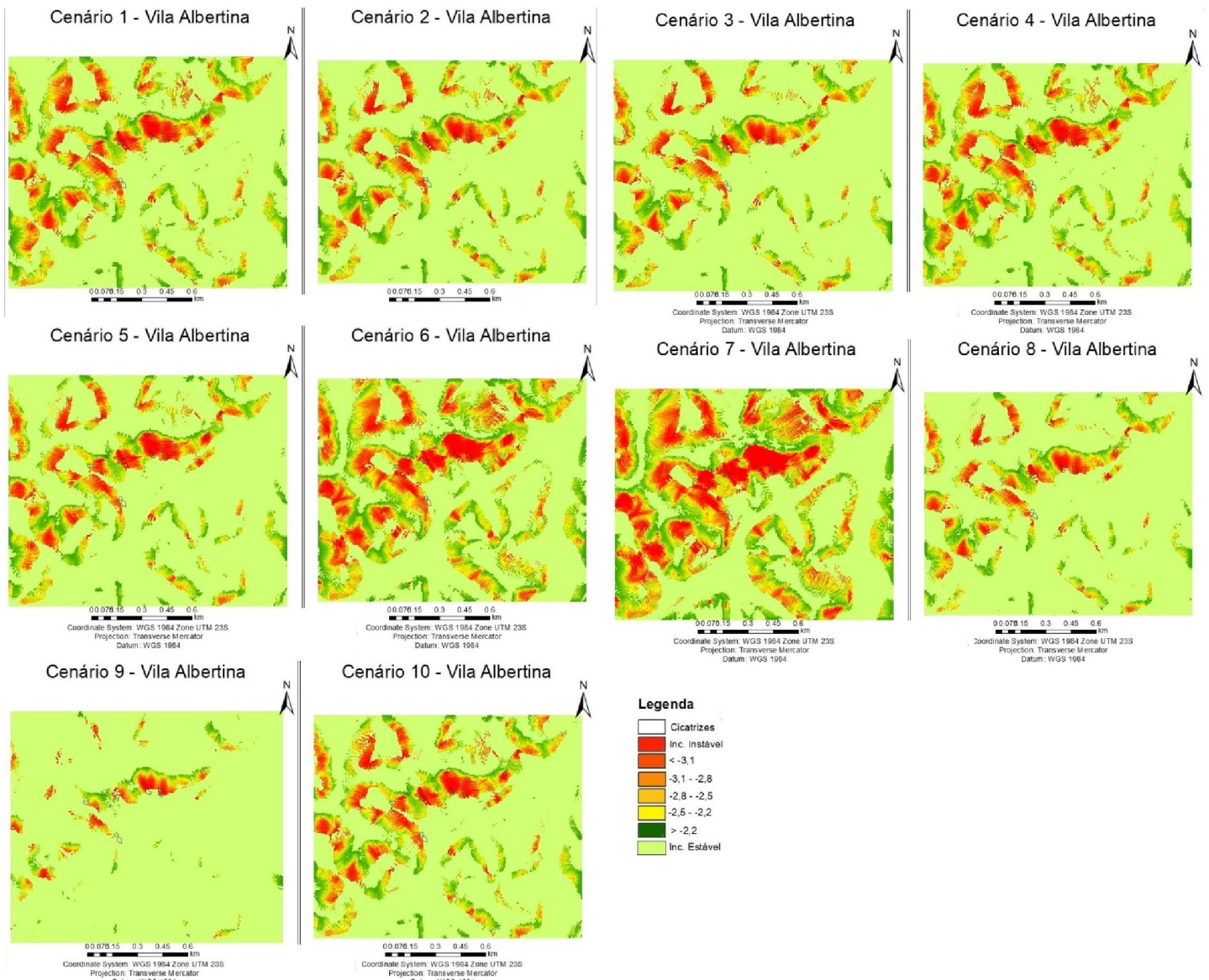
WISNER, B., BLAIKIE, P., CANNON, T., DAVIS, I. **At risk**: natural hazards, people's vulnerability and disasters. London: Routledge, 2003. Disponível em: <https://www.preventionweb.net/files/670_72351.pdf>. Acesso em: 26 set. 2017.

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 Sciences**, v. 5, p. 332-344, 2005. Disponível em: <<http://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/5/331/2005/nhess-5-331-2005.pdf>>. Acesso em: 15 fev. 2017.

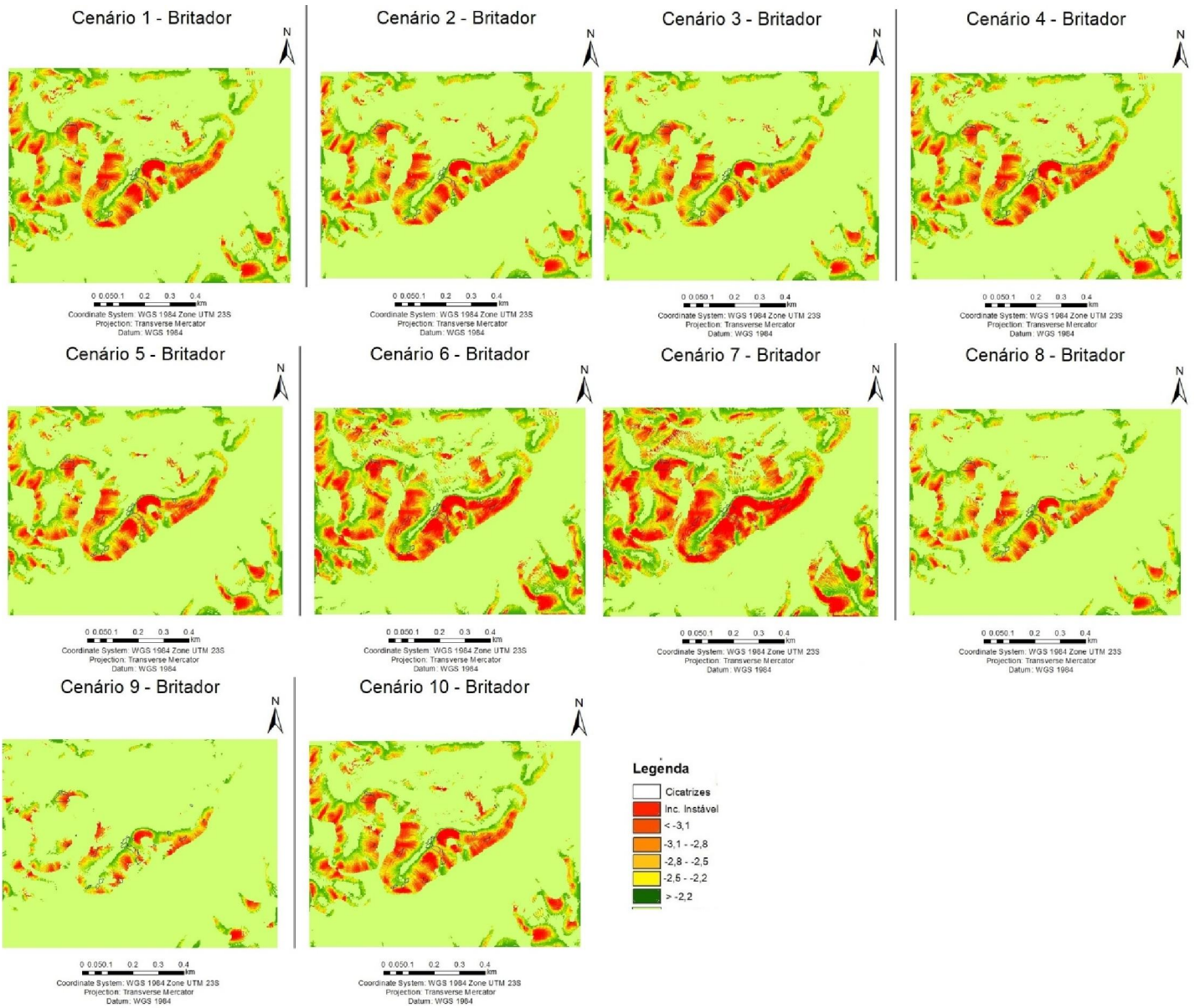
APÊNDICE A – Árvore de Decisão gerada pelo algoritmo CART.



APÊNDICE B – Cenários 1 a 10 agrupados do bairro Vila Albertina.



APÊNDICE C – Cenários 1 a 10 agrupados do bairro Britador.



APÊNDICE D – Mapeamento das Áreas de Risco à deslizamentos em Campos do Jordão realizado pelo IG.

