



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

sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/07.26.03.12-TDI

APLICAÇÃO DE VARIÁVEIS GEOMORFOMÉTRICAS AO MAPEAMENTO DE PADRÕES DE RELEVO NA BACIA DO RIO ITAJAÍ-AÇU/SC

Jéssica Gerente

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Sensoriamento Remoto, orientada
pelo Dr. Márcio de Morisson
Valeriano, aprovada em 07 de
agosto de 2018.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3RGR3NL>>

INPE
São José dos Campos
2018

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Gabinete do Diretor (GBDIR)
Serviço de Informação e Documentação (SESID)
CEP 12.227-010
São José dos Campos - SP - Brasil
Tel.:(012) 3208-6923/7348
E-mail: pubtc@inpe.br

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

Dr. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos
Climáticos (CGCPT)

Membros:

Dra. Carina Barros Mello - Coordenação de Laboratórios Associados (COCTE)

Dr. Alisson Dal Lago - Coordenação-Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas
(CGCEA)

Dr. Evandro Albiach Branco - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (COCST)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia e Tecnologia
Espacial (CGETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação-Geral de Observação da Terra
(CGOBT)

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação - (CPG)

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 Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação
(SESID)

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

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Murilo Luiz Silva Gino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)



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

sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/07.26.03.12-TDI

**APLICAÇÃO DE VARIÁVEIS GEOMORFOMÉTRICAS
AO MAPEAMENTO DE PADRÕES DE RELEVO NA
BACIA DO RIO ITAJAÍ-AÇU/SC**

Jéssica Gerente

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Sensoriamento Remoto, orientada
pelo Dr. Márcio de Morisson
Valeriano, aprovada em 07 de
agosto de 2018.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3RGR3NL>>

INPE
São José dos Campos
2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Gerente, Jéssica.

G314a Aplicação de variáveis geomorfométricas ao mapeamento de padrões de relevo na bacia do Rio Itajaí-Açu/SC / Jéssica Gerente.
– São José dos Campos : INPE, 2018.
xxiv + 105 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/07.26.03.12-TDI)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2018.
Orientador : Dr. Márcio de Morisson Valeriano.

1. Geomorfometria. 2. Padrões de relevo. 3. Classificação.
I.Título.

CDU 528.8:551.43(816.4)



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/).

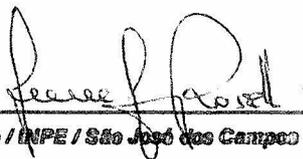
Aluno (a): Álvaro Corato

Título: "APLICAÇÃO DE VARIÁVEIS GEOMORFOMÉTRICAS AO MAPEAMENTO DE PADRÕES DE RELEVO NA BACIA DO RIO ITAJAÍ-AÇU/SC"

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

Sensoriamento Remoto

Dra. Dilce de Fátima Rossetti



Presidente / INPE / São José dos Campos - SP

Participação por Víteo - Conferência

Aprovado Reprovado

Dr. Márcio de Morisson Valeriano

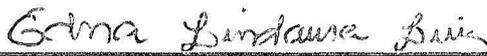


Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Participação por Víteo - Conferência

Aprovado Reprovado

Dra. Edna Lindaura Luiz



Convidado(a) / UDESC / Florianópolis - SC

Participação por Víteo - Conferência

Aprovado Reprovado

Este trabalho foi aprovado por:

matéria cômputo

memorização

São José dos Campos, 07 de agosto de 2010

“It always seems impossible until it's done.”

Nelson Mandela

À minha vó Maria (*In memoriam*), à minha tia Vera e à minha mãe.

Eterna gratidão.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Dr. Márcio de Morisson Valeriano, pela oportunidade, ensinamentos e auxílio concedidos ao longo da minha trajetória de mestrado. Além da formação técnica, agradeço por compartilhar comigo seus valores e me fazer enxergar as coisas por outra perspectiva. Obrigada pela liberdade de poder tomar decisões e pelo direcionamento nos momentos de incerteza.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsa de mestrado, o que tornou viável a realização deste trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto pelos ricos ensinamentos proporcionados por meio do corpo docente, pela infra-estrutura e apoio cedidos para realização deste trabalho.

À turma PGSER 2016, pelo companheirismo, apoio e por tornarem minha estadia no INPE muito mais leve e divertida. Em especial, agradeço aos meus colegas e frequentadores do LTID, Alindomar, Thales, Bruno, Camile, Bárbara, Priscila, Natália, Paula, Maria, Raquel, Clarissa, Mikhaela, Erone, Anderson, Hilton e Lidiane, pelo ótimo convívio, conversas e amizade.

Ao Dr. Eder Paulo Moreira por todas as conversas e ajudas prestadas durante o desenvolvimento desta pesquisa.

À banca examinadora desta dissertação pela disponibilidade e pelas contribuições.

À minha família, por tudo.

RESUMO

O objetivo desta pesquisa foi desenvolver metodologias para aplicação de dados geomorfométricos derivados do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) no mapeamento do relevo da bacia do rio Itajaí-Açu, Santa Catarina, em diferentes táxons. Análises qualitativas (sobretudo interpretação visual) e quantitativas (análise de agrupamento, análise de histogramas, etc.) foram realizadas sobre descritores geomorfométricos de modo a auxiliar no reconhecimento de padrões do relevo. No primeiro táxon foram mapeadas as seguintes classes: planícies, terrenos cristalinos e terrenos sedimentares. No segundo táxon, os terrenos cristalinos foram subdivididos em montanhosos e ondulados a forte ondulados e os terrenos sedimentares em dissecados e suave ondulados. Para o terceiro táxon foram geradas classes de escarpas e colinas. Terrenos com altura topográfica de até 13m foram classificados como planícies. Para as feições do 1º e 2º táxon, unidades mapeamento foram criadas por meio de segmentação, a qual teve como base a utilização de dados normalizados de declividade e dissecação vertical. Exclusivamente para a subdivisão dos terrenos sedimentares, a altimetria foi usada como entrada para a segmentação. A classificação das unidades de mapeamento do 1º táxon foi realizada por meio de análise de agrupamento, sendo que a moda de intervalos de declividade seguida por um reagrupamento de acordo com limiar de altimetria média de 400m apresentou resultados satisfatórios. Os padrões classificados no 1º táxon refletiram a disposição geral de classes presentes no mapeamento RADAMBRASIL, com taxas de correspondência superiores a 80%. Para as subdivisões dos terrenos cristalinos e sedimentares, foram realizados, respectivamente, fatiamento da frequência de classes de textura por segmento e fatiamento dos valores médios de declividade por segmento. Para o mapeamento das escarpas, no 3º táxon de análise, o fatiamento da declividade foi o método mais simples e satisfatório. A associação das classes convexo-divergentes e côncavos divergentes da variável geomorfométrica de forma do terreno gerou bons resultados para o mapeamento de classes correspondentes a colinas. A abordagem apresentada por este trabalho se mostra como uma alternativa para os métodos tradicionais de mapeamento, pois permite a exploração e extração de informações quantitativas do terreno. Para a adoção desta abordagem em outras áreas de estudo, recomenda-se o mesmo tipo de desenvolvimento metodológico – ciclos de testes com variáveis potencialmente úteis, verificações visuais, delimitação de unidades de mapeamento, caracterização geomorfométrica e classificação – uma vez que as características e peculiaridades da área mostraram-se decisivas para a escolha das variáveis e dos métodos de análise.

Palavras-chave: Geomorfometria. Padrões de Relevo. Classificação.

GEOMORPHOMETRIC VARIABLES APPLIED TO TERRAIN PATTERNS CLASSIFICATION IN THE ITAJAÍ-AÇU WATERSHED

ABSTRACT

This research aimed to develop methodologies for the application of geomorphometric data derived from SRMT (*Shuttle Radar Topography Mission*) in *Itajaí-Açu's* (*Santa Catarina*) watershed terrain mapping in different taxonomic levels. Qualitative analysis (mainly visual interpretation) and quantitative analysis were applied to geomorphometric variables, in order to assist in the recognition of terrain patterns. In the first level, the following categories were mapped: flat terrain, sedimentary fanerozoic terrain and crystalline terrain. In the second taxonomic level, the crystalline terrain was subdivided into mountainous and strong-undulated terrain and the sedimentary fanerozoic terrain into dissected and undulated terrain. Cliffs and hills were added as categories in the third level. Terrains with topographic height of up to 13m were classified as flat terrain. For the features of 1st and 2nd taxonomic level, mapping units were created through segmentation, which was based on normalized slope and vertical dissection data. Exclusively for the subdivision of sedimentary fanerozoic terrain, altimetry was used as input for the segmentation. The classification of mapping units of the 1st level was performed by cluster analysis over the modal slope interval of each segment, followed by regrouping according to averaged elevation, relative to a threshold of 400m, and presented satisfactory results. The patterns classified in the 1st level reflected the general distribution of classes of RADAMBRASIL mapping, with correspondence rates over 80%. For the subdivision of sedimentary fanerozoic and crystalline terrain the classification was performed by simply applying threshold values of texture frequency per segment and average slope per segment. For delineation of cliffs, in the 3th level of analysis, a threshold value based on slope was the simplest and satisfactory method. The association of the convex-divergent and concave-divergent landforms produced good results in the mapping of soft hills. The approach presented by this research is an alternative for traditional mapping methods because of the extraction and analysis of quantitative terrain information. For the application of this approach in other areas, the same type of methodological development – cycles of tests with potentially useful variables, visual checks, delimitation of mapping units, geomorphometric characterization and classification – is recommended, since the area characteristics and its peculiarities were decisive for the choice of variables and analysis methods.

Keywords: Geomorphometry. Terrain Patterns. Classification.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 - Combinação das curvaturas para caracterização das formas de terreno.....	13
Figura 3.1 - Mapa de localização da bacia do rio Itajaí-Açu (SC).....	19
Figura 3.2 - Mapa geológico da bacia do rio Itajaí-Açu.	21
Figura 3.3 - Carta estratigráfica da bacia sedimentar do Paraná. As rochas que afloram na bacia hidrográfica do Itajaí-Açu se iniciam no Grupo Itararé.	23
Figura 3.4 - Mapa geomorfológico da bacia do rio Itajaí-Açu.	26
Figura 4.1 - Fluxo metodológico para classificação das feições referentes ao primeiro táxon.....	33
Figura 4.2 – <i>Raster</i> binário resultante da seleção de valores extremos e intermediários de textura de relevo nos terrenos do embasamento cristalino..	39
Figura 5.1 - Resultado da classificação dos terrenos correspondentes às planícies. Os quadros A e B mostram uma visualização mais detalhada da delimitação.	46
Figura 5.2 - Frequências da dissecação vertical e declividade, antes e após normalização.....	49
Figura 5.3 - Distribuição espacial dos valores de declividade e dissecação vertical, antes e após serem normalizadas.	50
Figura 5.4 - Composição colorida entre a declividade e a dissecação vertical.	51
Figura 5.5 - Resultado da segmentação para tamanhos de segmento de 153 (A) e 63 (B), utilizando a declividade e dissecação vertical como planos de informação de entrada.	53
Figura 5.6 - Perfil topográfico entre zona de transição entre terrenos cristalinos (à direita) e terrenos sedimentares (à esquerda).	55
Figura 5.7 - Resultado da análise de agrupamento para cada variável geomorfométrica utilizando o método hierárquico para constituição de 5 grupos.....	56
Figura 5.8 - Distribuição da média altimétrica de unidades formadas por contiguidade espacial entre segmentos de mesma classe de agrupamento	

(barras vazadas) sobreposto ao histograma da distribuição da elevação local (pixel a pixel), em barras preenchidas em cinza.	57
Figura 5.9 - Comparação entre as classes geomorfológicas existentes no mapa do RADAMRASIL ('A') e as obtidas pela metodologia deste trabalho ('B').	59
Figura 5.10 - Comparação entre as delimitações geradas pelo mapeamento do RADAMBRASIL, o mapeamento geológico da CPRM e pela classificação proposta.	61
Figura 5.11 – Sombreamento de relevo (mapa A), declividade (mapa B) e textura de relevo (mapa C).	64
Figura 5.12 - Resultado da segmentação do segundo táxon (terrenos cristalinos).	66
Figura 5.13 – Relação visual entre as variáveis de declividade e textura de relevo.	67
Figura 5.14 - Frequência de valores representando textura fina e textura grossa em terrenos correspondentes ao embasamento cristalino.	68
Figura 5.15 - Classificação final da subdivisão dos terrenos cristalinos referentes ao 2º táxon.	70
Figura 5.16 - Contraste entre os padrões de alta declividade vistos no quadro B da Figura 5.15.	71
Figura 5.17 - Distribuição espacial do sombreamento (mapa A), declividade (mapa B) e textura (mapa C).	72
Figura 5.18 - Resultado da segmentação do segundo táxon (terrenos sedimentares) utilizando a altimetria como dado de entrada.	74
Figura 5.19 - Disposição das camadas sedimentares em vertentes de classes de declividade alternadas e seu perfil altimétrico escalonado.	75
Figura 5.20 - Classificação final da subdivisão dos terrenos sedimentares referentes ao 2º táxon.	77
Figura 5.21 - Classificação final do táxon 2.	79
Figura 5.22 - Disposição do terreno colinoso entre a planície (1º plano) e relevo montanhoso à direita.	80
Figura 5.23 - Resultado do mapeamento de colinas a partir da forma de terreno.	81

Figura 5.24 - Mapeamento final da classe de colinas.	82
Figura 5.25 - Classificação das escarpas isoladas dos terrenos cristalinos.	83
Figura 5.26 - Declividade normalizada (terrenos sedimentares).	84
Figura 5.27 - Classificação das escarpas isoladas dos terrenos sedimentares.	86
Figura 5.28 – Disposição 3D das escarpas.	87
Figura 5.29 - Visualização das feições de escarpas isoladas em relação às formações geológicas existentes nos terrenos sedimentares.	88
Figura 5.30 – Mapa geomorfológico final obtido com os processos metodológicos desenvolvidos por este trabalho.	89

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 2.1 - Comparação entre as características de MDEs globais.....	8
Tabela 5.1 - Avaliação quantitativa entre o mapa oficial e o obtido neste trabalho.	62
Tabela 5.2 - Quantificação das áreas totais mapeadas por cada classe.	91
Tabela 5.3 - Unidades de mapeamento (UMs) e método/variáveis aplicados nos processos de mapeamento das classes finais de legenda.	93

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ASI	<i>Agenzia Spaziale Italiana</i>
ASTER	<i>Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer</i>
BCSF	Bacias e Coberturas Sedimentares Fanerozóicas
CIRAM	Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina
CN	Crátons Neoproterozóicos
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DLR	<i>Deutsches Zentrum für Lu-und Raumfahrt</i>
DOD	<i>Department of Defense</i>
DQS	Depósitos Quaternários Sedimentares
EC	Erros de Comissão
EO	Erros de Omissão
EPAGRI	Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina
ESP2	<i>Estimation of scale parameter 2</i>
ETM+	<i>Enhanced Thematic Mapper</i>
FN	Falso negativo
FP	Falso positivo
FT	Forma de terreno
GDEM	<i>Global Digital Elevation Model</i>
GEOBIA	<i>Geographic Object-Based Image Analysis</i>
HydroSHEDS	<i>Hydrological data and maps based on Shuttle Elevation Derivates at multiple scales</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
InSAR	<i>Interferometric Synthetic Aperture Radar</i>
LANDSAT	Land Remote Sensing Satellite
LiDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDS	Modelo Digital de Superfície

MDT	Modelo Digital de Terreno
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NIMA	<i>National Imagery and Mapping Agency</i>
OBIA	<i>Object-based Image Analysis</i>
PD	Porcentagem de Detecção
RADAM	Radarda Amazônia
RADAR	<i>Radio Detection and Range</i>
SAR	<i>Synthetic Aperture Radar</i>
SC	Santa Catarina
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SIVAM	Sistema de Vigilância da Amazônia
SLAR	<i>Side-looking airborne radar</i>
SPOT	<i>Satellite Pour l'Observation de la Terre</i>
STRM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
SWIR	<i>Short-Wave Infrared</i>
TIR	<i>Thermal Infrared</i>
TM	<i>Thematic Mapper</i>
TOPODATA	Banco de dados geomorfométricos do Brasil
UM	Unidade de Mapeamento
VNIR	<i>Visible and near-infrared</i>
VP	Verdadeiro positivo
ZCAS	Zona de convergência do Atlântico sul

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1 Mapeamento geomorfológico no Brasil.....	5
2.2 Modelos Digitais de Elevação	7
2.3 Geomorfometria e variáveis geomorfométricas	11
2.4 Abordagens de geoprocessamento para obtenção de unidades de mapeamento	15
3 ÁREA DE ESTUDO	19
3.1 Clima e Hidrografia	20
3.2 Geologia	20
3.3 Geomorfologia	25
4 MATERIAL E MÉTODOS	29
4.1 Dados	29
4.2 Recursos de geoprocessamento	30
4.3 Metodologias aplicadas ao mapeamento.....	30
4.3.1 Primeiro nível hierárquico.....	32
4.3.1.1 Planícies	34
4.3.1.2 Terrenos sedimentares e cristalinos	34
4.3.2 Segundo nível hierárquico.....	37
4.3.2.1 Terrenos cristalinos ondulados a forte ondulados e montanhosos ..	37
4.3.2.2 Terrenos sedimentares dissecados e suave ondulados	39
4.3.3 Terceiro nível taxonômico	40
4.3.3.1 Colinas	40
4.3.3.2 Escarpas dos terrenos cristalinos	41
4.3.3.3 Escarpas dos terrenos sedimentares.....	41
4.4 Avaliação dos resultados	42
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
5.1 Primeiro táxon.....	45
5.1.1 Planícies.....	45

5.1.2	Terrenos cristalinos e sedimentares.....	48
5.1.2.1	Variáveis para segmentação.....	48
5.1.2.2	Segmentação.....	52
5.1.2.3	Classificação.....	55
5.1.2.4	Avaliação da classificação	58
5.2	Segundo táxon.....	63
5.2.1	Terrenos cristalinos montanhosos e ondulados a forte ondulados	63
5.2.1.1	Segmentação.....	65
5.2.1.2	Subdivisão dos terrenos cristalinos.....	67
5.2.2	Terrenos sedimentares dissecados e suave ondulados.....	72
5.2.2.1	Segmentação.....	73
5.2.2.2	Subdivisão dos terrenos sedimentares	76
5.2.3	Classificação final do segundo táxon	78
5.3	Terceiro Táxon.....	79
5.3.1	Colinas	79
5.3.2	Escarpas dos terrenos cristalinos	82
5.3.3	Escarpas dos terrenos sedimentares	84
5.4	Mapeamento final	89
6	CONCLUSÕES.....	96
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99

1 INTRODUÇÃO

O território brasileiro apresenta uma ampla diversidade de compartimentos e formas de relevo, o que torna o mapeamento geomorfológico uma tarefa complexa. Mapas geomorfológicos classificam o relevo de acordo com critérios morfológicos, estruturais, genéticos e cronológicos (BISHOP et al, 2012). Os compartimentos desses mapas são gerados, sobretudo, a partir da definição de unidades homogêneas em determinado aspecto (DENT; YOUNG, 1891), aqui referidas por unidades de mapeamento.

O mapa geomorfológico derivado do projeto RADAMBRASIL, realizado na década de 1970 por meio de técnicas de interpretação visual, é a principal referência em termos de mapeamento sistemático nacional. Para muitas localidades, o RADAM é a única fonte cartográfica geomorfológica oficial. As classes mapeadas nesse projeto foram divididas em quatro táxons de análise, o primeiro é o mais generalista e se baseia, sobretudo, no arcabouço geológico. O último táxon apresenta feições em nível mais detalhado, em que são representadas formas relevo, tais como tipos de topos de morro, desconsiderando as diferenças litológicas.

Para boa parte do território do estado de Santa Catarina, os táxons intermediários do RADAMBRASIL (2º e 3º) apresentam detalhamento superior em relação ao 1º táxon. No entanto, para a região da bacia do rio Itajaí-Açu, não há uma subdivisão dos terrenos nesses táxons intermediários (com exceção às planícies e bordas oeste). Em outras palavras, o mapa geomorfológico do RADAM não apresenta uma subdivisão dos compartimentos geomorfológicos correspondentes a terrenos sedimentares fanerozóicos e cristalinos, os quais permanecem com o mesmo nível de detalhamento até o 4º táxon (formas).

Abordagens digitais podem proporcionar maior velocidade, padronização e reprodutibilidade no mapeamento do relevo. Em particular, modelos digitais de elevação (MDEs) são fontes de dados de grande potencial para a interpretação

do relevo, possibilitando a extração de informações geométricas, numéricas e visuais (PIKE, 2000).

É possível observar uma ênfase crescente no desenvolvimento de técnicas de cartografia de detalhe. Por outro lado, mapeamentos regionais necessitam informações generalizadas, as quais necessitam de processos apropriados para que sejam efetivamente úteis e adequadas à escala de leitura e/ou representação dos dados. Abordagens de regionalização de dados geomorfométricos ainda não foram intensivamente exploradas para muitas regiões do Brasil como, por exemplo, a bacia do rio Itajaí-Açu (SC), em que o trabalho de Muñoz (2014) é um dos poucos exemplos de aplicação de dados geomorfométricos na área.

Na bacia do rio Itajaí-Açu, episódios de inundações e movimentos de massa são frequentes e geram graves consequências para a sociedade. No entanto, somente após os eventos catastróficos de 2008 esta região se tornou mais visada pela comunidade científica. Além da suscetibilidade a desastres naturais, a bacia está localizada em uma área de geologia complexa e variada, possuindo rochas com idade superior a 2,5 bilhões de anos derivadas de diversos eventos tectônicos (SIGA JUNIOR, 1995; FORNARI, 1998).

A singularidade dos terrenos, a necessidade de estudos a fim de subsidiar a gestão de riscos na bacia e a falta de detalhamento do mapa geomorfológico do RADAMBRASIL nos níveis taxonômicos 2 e 3 táxons justificam a análise do desempenho de processos e dados derivados de MDEs para a produção de conhecimento sobre as características do relevo da área de estudo.

O objetivo geral deste trabalho foi desenvolver metodologias baseadas na aplicação de dados geomorfométricos para o mapeamento do relevo da bacia do rio Itajaí-Açu/SC em diferentes táxons. Os objetivos específicos foram:

- a) Identificar as principais feições de relevo da bacia do rio Itajaí-Açu;
- b) Identificar dados geomorfométricos adequados para o estabelecimento de unidades de mapeamento ao longo dos táxons;

c) Testar processos de regionalização e síntese de dados geomorfométricos para caracterização e classificação de feições de relevo;

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O entendimento dos procedimentos e análises realizados neste trabalho requer a fundamentação dos seguintes tópicos: mapeamento geomorfológico no Brasil; modelos digitais de elevação; geomorfometria e variáveis geomorfométricas; e abordagens de geoprocessamento para obtenção de unidades de mapeamento.

2.1 Mapeamento geomorfológico no Brasil

Mapeamentos geomorfológicos podem representar tanto compartimentos e formas do relevo quanto processos ligados à sua dinâmica. O grau de detalhamento dessas representações varia de acordo com a escala adotada. Apesar de não haver padronizações de escalas e legendas voltadas ao mapeamento geomorfológico, Argento (1994) considera macroescalas como inferiores a 1:100.000, mesoescalas de 1:100.000 até 1:30.000 e, microescalas maiores ou iguais a 1:25.000. Mapeamentos em macroescala representam grandes compartimentos de relevo, vinculadas ao reconhecimento de estruturas geológicas. Mapeamentos em mesoescalas representam formas de relevo dentro dos compartimentos e consideram fatores como inclinação, forma da encosta, aprofundamento da drenagem e amplitude altimétrica. Mapeamentos em microescalas representam processos geomorfológicos ligados à dinâmica do relevo local, como feições inerentes a processos erosivos e deposicionais.

O primeiro projeto de mapeamento geomorfológico sistemático do território brasileiro foi realizado na década de 1970 pelo RADAMBRASIL. Elaborado na escala 1:250.000 para publicação em 1:1.000.000, este mapeamento foi baseado na interpretação visual de imagens de RADAR (banda X) aerotransportado de visada lateral (SLAR). A textura das imagens foi um elemento de grande influência para a interpretação de lineamentos estruturais e de feições do relevo (RADAMBRASIL, 1983), juntamente com a geometria das formas, classes de declividade, continuidade, descontinuidade, distribuição

espacial e intensidade de manifestações morfogenéticas do relevo (IBGE, 2009).

Os quatro primeiros táxons adotados foram: domínios morfoestruturais; regiões geomorfológicas; unidades geomorfológicas; e formas. Os domínios morfoestruturais (primeiro táxon) se baseiam no arcabouço geológico. As regiões geomorfológicas (segundo táxon) expressam, além de fatores geológicos, a influência de agentes externos modeladores do relevo, como clima pretérito e atual (IBGE, 2009). As unidades geomorfológicas (terceiro táxon) são classificadas de acordo com a configuração das formas de relevo e os tipos de modelados (acumulação, aplanamento ou dissecação) que nelas atuam (SANTA CATARINA, 1986). O quarto táxon corresponde à unidade de padrão de formas semelhantes, tais como planície, morros, cristas, etc.

O RADAMBRASIL permanece como a principal referência de mapeamento geomorfológico sistemático nacional, apesar de ter precedido as missões orbitais de maior impacto sobre o conhecimento do meio físico de nosso território, como LANDSAT, SPOT e SRTM. No entanto, até os dias atuais, não houve revisão oficial desse mapeamento a despeito da oferta de novos dados de sensoriamento remoto, sobretudo geomorfométricos.

Uma exceção à utilização exclusiva de métodos qualitativos para a elaboração de mapas oficiais foi o projeto SIVAM – Sistema de Vigilância da Amazônia (PIMENTA; SARTI, 2015). Elaborado pelo IBGE, objetivou inicialmente mapear somente a Amazônia Legal em escala 1:250.000, mas foi expandido para todo território nacional. O SIVAM utiliza como base cartográfica imagens Landsat (TM e ETM+) e dados de declividade e relevo sombreado extraídos do MDE SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) (PIMENTA; SARTI, 2015). Apesar da inserção de insumos mais atuais de sensoriamento remoto, o SIVAM não apresenta uma utilização intensiva ou mesmo otimizada de abordagens numéricas do terreno, como as possibilitadas pela geomorfometria. Pimenta e Sarti (2015) apresentam uma proposta vinculada à equipe de geomorfologia do IBGE para realização de testes para inserir etapas metodológicas mais automatizadas nos processos de mapeamento. Esta abordagem envolve a

segmentação multirresolução de dados oriundos do projeto TOPODATA (BRASIL, 2008) e a classificação supervisionada por meio de redes semânticas hierárquicas oriundas de análise de imagens baseada em objetos (OBIA) e modelos *fuzzy* para o estabelecimento dos limiares das classes mapeadas.

Em termos nacionais, é possível observar esforços para a elaboração de metodologias que envolvam processos automatizados de mapeamento do relevo. Metodologias utilizando OBIA para o mapeamento do relevo já foram executadas por alguns trabalhos (CAMARGO, 2008; PIMENTA et al., 2010; FERNANDES, 2013; KAWATA, 2014; GIRÃO, MELLO; FERNANDES, 2016). Apesar desses trabalhos terem gerado resultados interessantes, outras metodologias baseadas em MDE para o mapeamento do relevo ainda permanecem pouco exploradas no Brasil.

2.2 Modelos Digitais de Elevação

MDEs são representações digitais da variação da altitude (TOUTIN, 2008; MARK, 2009). Apesar de existirem outras terminologias, como modelo digital de terreno (MDT) e modelo digital de superfície (MDS), o termo *elevação* se refere à grandeza representada (distância medida na vertical), independentemente de sua natureza, relacionada à altitude do terreno ou à superfície de objetos sobre ela dispostos. A expressão MDE assim definida representa um conceito geral, que engloba MDT, MDS e as demais possibilidades.

MDEs podem ser obtidos por meio de sensores ópticos, radares de abertura sintética (SAR) e *light detection and ranging* (LiDAR), além de topografia em campo. Modelos gerados por LiDAR geralmente se aplicam em estudos locais, dado a alta resolução espacial. Os dados topográficos gerados por imagens de sensores ópticos são, em geral, obtidos por técnicas de estereoscopia. Os modelos derivados de imagens de radar de abertura sintética podem ser gerados por técnicas de interferometria (InSAR), polarimetria e clinometria (TOUTIN, 2008). Desde o início dos anos 2000, missões orbitais forneceram MDEs de abrangência global ou quase global, disseminando o uso e

aplicações deste tipo de dado de sensoriamento remoto. Algumas missões de extensa abrangência e com disponibilização gratuita de dados foram o ASTER-GDEM (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer - Global Digital Elevation Model*), SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*) e TanDEM-X (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 - Comparação entre as características de MDEs globais.

MDE	Cobertura	Comprimento de onda	Princípio de aquisição	Duração da missão	Precisão vertical absoluta	Resolução espacial
ASTER GDEM (GDEM2)	83° N - 83° S	0,76 - 0,86 μm	Estereoscopia	1999 até os dias atuais	~ 17 m	2,4 arco-segundos (~72 m)
SRTM Banda C	60° N - 56° S	~ 5,6 cm	Interferometria SAR	11 a 22 de fevereiro de 2000	~ 16m	3 arco-segundos (~90 m) e 1 arco-segundo (~30 m)
TanDEM-X	90° N - 90° S	~ 3 cm	Interferometria SAR	2010 até os dias atuais	~ 10 m	0,4 arco-segundos (~12 m)

Fonte: Rabus et al. (2003), Tachikawa et al. (2011), Krieger et al. (2014).

O SRTM foi uma missão espacial realizada entre 11 e 22 de fevereiro de 2000 pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) em conjunto com o NIMA (*National Imagery and Mapping Agency*) e o DOD (*Department of Defense*) dos Estados Unidos, além das agências espaciais alemã (DLR) e italiana (ASI). O SRTM coletou dados de radar nas bandas C (comprimento de onda de ~5 cm) e X (comprimento de onda de ~3 cm) entre as latitudes 60°N e 56°S, recobrando cerca de 80% da Terra (JPL, 2017). Havia em órbita duas antenas de radar, a principal estava a bordo da plataforma e a secundária estava separada por um mastro de aproximadamente 60 m (RABUS et al., 2003). Esta configuração permitiu o processamento de técnicas de

interferometria SAR devido à diferença de fase entre os sinais adquiridos pelas duas antenas com ângulos de visada ligeiramente diferentes.

Até 2014, os dados SRTM da banda C disponíveis para todas as áreas do globo consistiram em versões dos dados na resolução espacial de 3 arco-segundos (aproximadamente 90 m), com exceção dos Estados Unidos, que dispunham, também, dos dados originalmente adquiridos na resolução de 1 arco-segundo (aproximadamente 30m). O MDE adquirido na banda X, por sua vez, apresenta cobertura incompleta da superfície terrestre e seu uso é restrito.

Uma característica importante do SRTM (em ambas as bandas) é que, devido à frequência relativamente alta se comparada a outras bandas do radar, tem baixa penetração das ondas nos alvos (LE TOAN et al., 1992). Os dados adquiridos na banda C penetram parcialmente coberturas vegetais densas, sem atingir a superfície do terreno. Desta forma, o SRTM apresenta sensibilidade a alvos presentes na superfície, tais como edificações e antenas, além das variações da cobertura vegetal (KELLNDORFER et al., 2004). Os dados da banda X, de menor penetração, são ainda mais afetados pelo efeito dossel. Esta característica acentua a existência de artefatos nesses MDEs. Conforme comentado por Valeriano et al. (2006), em áreas desflorestadas é possível observar um maior detalhamento da rede de drenagem no MDE do que nas áreas vegetadas. Sendo assim, irregularidades na altura do dossel podem afetar o cálculo de algumas variáveis morfométricas (como declividade e perfil de curvatura) e na extração automática da rede de drenagem. Assim, algumas feições presentes no SRTM e suas derivações morfométricas podem não corresponder à morfologia do terreno, sobretudo quando avaliadas em detalhe.

O ASTER foi lançado em 1999 a bordo da plataforma Terra. Este sensor possui 3 bandas nos comprimentos de onda do VNIR (visível e infravermelho próximo), 6 bandas na faixa do SWIR (infravermelho de ondas curtas) e 5 bandas no TIR (infravermelho termal) (NASA, 2004). Na faixa do VNIR, há dois telescópios de visadas nadir e lateral (cerca de 24°). Este segundo telescópio capta a energia eletromagnética refletida dos alvos cerca de 55 segundos após

o imageamento nadir (TOUTIN, 2008). A paralaxe entre as visadas permite obtenção de pares estereoscópicos para a possibilidade da geração de MDE. O ASTER GDEM, elaborado a partir de imagens ASTER, teve sua primeira versão disponibilizada em 2009 com recobrimento de 99% da superfície terrestre (indo de 83°N a 83°S) e resolução espacial de 30 m. Os pontos homólogos dos pares estereoscópicos ASTER foram automaticamente detectados por meio de um algoritmo especialmente desenvolvido para a geração deste modelo global. A segunda versão, GDEM V2, apresentou melhora da precisão horizontal e vertical e na detecção de corpos d'água superficiais (TACHIKAWA et al., 2011).

O TanDEM-X, cujo produto de maior difusão é chamado de WorldDEM, está operacional desde 2010 e pode ser citado como uma das missões mais recentes para concepção de um MDE global, tendo: precisão vertical relativa de 2 e 4m para inclinações menores que 20% e maiores que 20%, respectivamente; precisão vertical absoluta de 10 m e resolução espacial de 0,4 arco-segundos (~ 12 m) (KRIEGER et al., 2014). Segundo Riegler e Henning (2015), para assegurar a homogeneidade da qualidade deste MDE, áreas com terrenos muito inclinados e com cobertura vegetal densa foram imageadas três ou quatro vezes. Esta missão, derivada de uma parceria entre a Agência Espacial Alemã (DLR) e a empresa *Airbus Defence and Space*, utiliza dois satélites TerraSAR-X em órbitas próximas e controladas, tipicamente com distâncias entre 250 e 500 m (KRIEGER et al., 2007). Apesar de possuir boas configurações, principalmente em relação à resolução espacial, o TanDEM-X não é disponibilizado gratuitamente.

Dada a uniformidade dos MDEs de escala global, alguns esforços foram feitos para criar bases extensas e mapeamentos a partir do processamento e derivação de MDEs, com destaque para o SRTM. Iwahashi e Pike (2007) desenvolveram um método para extrações de informações topográficas a partir do SRTM que resultou no mapeamento mundial de tipos de terreno utilizando três variáveis geomorfológicas: declividade, textura de superfície e convexidade local. O método proposto por estes autores envolve a análise de

estatísticas regionais sobre o MDE, seguida da classificação do terreno por meio de abordagem não supervisionada. Este procedimento inclui diversas operações de SIG sobre as variáveis geomorfométricas, tais como segmentação, filtragens e fatiamentos.

Outra base de cobertura mundial derivada dos dados SRTM é o HydroSHEDS - *Hydrological data and maps based on Shuttle Elevation Derivates at multiple scales* (LEHNER; DÖLL, 2004), que disponibiliza um banco de dados com delimitação de bacias hidrográficas, redes de drenagem, direção e acumulação de fluxo em escalas variadas.

Em cobertura nacional, o projeto TOPODATA (BRASIL, 2008) consiste em um banco de dados geomorfométricos do território brasileiro a partir da primeira versão dos dados SRTM disponibilizados para a América do Sul, de 3 arco-segundos. Nesse projeto, foi realizado o refinamento dos dados SRTM de 3 arco-segundos para 1 arco-segundo com uma interpolação por krigagem. A partir do MDE refinado, foram derivadas as variáveis geomorfométricas básicas locais, tais como declividade, orientação de vertentes, curvatura horizontal e vertical (VALERIANO; ALBUQUERQUE, 2010). Ainda foram disponibilizadas imagens de sombreamento do relevo e uma representação do delineamento de divisores d'água e talvegues. Além dos dados em formato específico para processamentos em SIG, o projeto fornece o conjunto completo em representações pictóricas das variáveis geomorfométricas elaboradas para visualização direta e edição gráfica (VALERIANO, 2008).

2.3 Geomorfometria e variáveis geomorfométricas

A geomorfometria é uma ciência de quantificação e análise da superfície terrestre (PIKE, 2000), possibilitando a abordagem matemática de características geométricas da paisagem (EVANS, 1972). Os MDEs são a fonte primordial de dados para aplicações geomorfométricas, sendo a extração de descritores do relevo (variáveis geomorfométricas) uma das principais contribuições da geomorfometria para a elaboração de mapeamentos geomorfológicos.

As variáveis geomorfométricas podem ser classificadas como *locais* e *não-locais* (ou regionais). As variáveis locais dependem somente da elevação de um grupo restrito de dados de extensão delimitada por um dispositivo (virtual) denominado janela móvel, que coordena as operações de vizinhança. Exemplos de variáveis locais incluem, além da própria altitude, orientação de encostas, declividade, curvatura vertical, curvatura horizontal e forma de terreno (PIKE, 2000). Por outro lado, variáveis não locais ou regionais possuem relações com um maior número de células adjacentes e não apenas com as imediatamente vizinhas. Por sua natureza, muitas delas costumam necessitar da partição da área estudada em *unidades de terreno* (em geoprocessamento: segmentos de área) pré-definidos para seu cálculo, o que nem sempre é possível com o uso de janelas móveis. Exemplos de variáveis regionais são: altura topográfica, dissecação vertical, textura de relevo, integral hipsométrica, predominância de relevo e dissecação vertical ou relevo relativo (PIKE, 2000).

A altimetria se refere à medida de elevação de um ponto na superfície terrestre acima de um determinado *datum*, usualmente o nível médio do mar. Em geral, ela é lida diretamente do valor dos *pixels* de um MDE ou do valor da cota de curvas de nível. As demais variáveis geomorfométricas são derivações da altimetria e suas combinações. A declividade, primeira derivada da altimetria, refere-se à taxa de mudança da altitude com relação a uma distância horizontal, sendo possivelmente a variável mais importante para estudos geomorfológicos (EVANS, 1972), uma vez que está associada à força com que a gravidade age sobre a movimentação de fluxos superficiais e subsuperficiais (WILSON; GALLANT, 2000).

As curvaturas do terreno podem ser decompostas em suas componentes verticais e horizontais. A curvatura vertical, ou curvatura em perfil, pode ser definida como uma medida de variação da declividade em uma dada distância horizontal. Refere-se à forma, em perfil, de uma superfície, quanto à sua expressão como côncava, convexa ou retilínea. Tem efeito direto na aceleração/desaceleração dos fluxos gravimétricos ao longo das vertentes e, portanto, no equilíbrio entre os processos de remoção e acúmulo de material

(água, sedimentos). A curvatura horizontal é definida como a primeira derivada da orientação de vertentes e indica o formato da encosta observada em projeção horizontal quanto ao grau de convergência ou de divergência (ou neutra: *planar*) dos fluxos de transporte gravimétrico ao longo das vertentes. Ambas as curvaturas são expressas em uma medida de ângulo por distância ($^{\circ}/m$, por exemplo), variando entre valores positivos e negativos (nulo para condição neutra ou retilínea) e podem ser classificadas em suas configurações típicas para, combinadas, definir a forma do terreno, conforme esquematizado na Figura 1.1. (VALERIANO, 2008).

Figura 2.1 - Combinação das curvaturas para caracterização das formas de terreno.

		Curvatura horizontal		
		convergente	planar	divergente
Curvatura vertical	côncava			
	retilínea			
	convexa			

Fonte: Valeriano (2008) - Adaptado de Dikau (1990).

A rugosidade de superfície ou de relevo é uma variável não local e por isso depende do estabelecimento de unidades do terreno, para a delimitação dos subconjuntos de dados sobre os quais recaem os cálculos para sua estimativa. Entre várias formulações propostas para sua obtenção, a rugosidade pode ser calculada como a variação de frequência entre os valores topográficos (Z) máximos e mínimos em um determinado espaçamento (X, Y) (IWAHASHI; PIKE, 2007). Ela é também denominada textura, uma vez que evidência o

caráter fino ou grosso do espaçamento entre as feições topográficas por representar o número de topos de morro ou fundos de vale dentro de uma determinada janela móvel ou área. Quanto menor for o número de divisores e talvegues, mais grosseira será a textura da superfície (IWAHASHI; PIKE, 2007).

A altura topográfica indica a distância vertical entre um ponto localizado sobre a superfície e sua projeção horizontal no plano de altitudes mínimas (MUÑOZ; VALERIANO, 2013). Nesse sentido, pode ser obtida pela diferença entre a altimetria do MDE original e as altitudes mínimas presentes em uma determinada área de busca (e.g. janelas móveis ou segmentos). Dado que se tem o MDE original como minuendo desta subtração, a altura apresenta uma variação local, isto é, se apresenta como uma variável geomorfométrica local.

A integral hipsométrica estima o grau de dissecação de uma unidade de paisagem (geralmente bacia hidrográfica) por meio de valores numéricos (usualmente 0 a 1) (STRAHLER, 1952). Pike e Wilson (1971) demonstraram matematicamente que a integral hipsométrica equivale à razão elevação-relevo (WOOD; SNELL, 1960), o que facilita sua obtenção com base em recursos de geoprocessamento. A razão elevação-relevo (E) expressa a proporção de terras altas dentro de uma unidade de terreno (PIKE; WILSON, 1971) e pode ser definida pela seguinte equação:

$$E = \frac{(\text{Elevação}_{\text{média}} - \text{Elevação}_{\text{mínima}})}{(\text{Elevação}_{\text{máxima}} - \text{Elevação}_{\text{mínima}})} \quad \text{Eq. (2.1)}$$

A predominância do relevo é uma métrica que demonstra a prevalência das elevações relativas de uma unidade de terreno, que pode se caracterizar como baixo-predominante (baixa frequência dos valores mais altos) ou alto-predominante (baixa frequência dos valores mais baixos) (MUÑOZ; VALERIANO, 2008). Pode ser obtida em SIG por meio do balanço entre os desvios negativos e positivos em relação à mediatriz da altitude dentro de cada unidade de terreno (MUÑOZ; VALERIANO, 2008).

A dissecação vertical, frequentemente chamada de relevo relativo ou amplitude altimétrica, é uma variável regional, calculada pela diferença entre a elevação máxima e mínima que ocorrem dentro de uma determinada área ou janela móvel. Evans (1972) comenta que a dissecação vertical pode resultar em valores extremos e, como solução, sugere que para seu cálculo sejam utilizados valores de desvio padrão. O mesmo autor ainda coloca que se a área ou janela móvel definida para seu cálculo for pequena em relação às variações topográficas, é improvável que ela contemple feições inteiras de relevo como, por exemplo, uma encosta. Neste sentido, a escolha do tamanho do polígono ou janela móvel deve englobar, pelo menos, a distância média entre dois interflúvios vizinhos (MARK, 1975).

2.4 Abordagens de geoprocessamento para obtenção de unidades de mapeamento

A disseminação relativamente recente dos MDEs possibilitou um aumento da utilização de variáveis geomorfométricas no mapeamento geomorfológico. A maior disponibilidade de dados, abordagens e algoritmos favorece o desenvolvimento de métodos baseados em análises numéricas como alternativa ou em complemento às técnicas de interpretação visual (BISHOP et al., 2012). No entanto, conforme colocado por Mark (2009), em um tipo de desenvolvimento contra-intuitivo, a melhoria da precisão e resolução de MDEs parece ter aumentado a lacuna conceitual e computacional entre a informação local (*pixel*) e unidades de relevo com significado real. Unidades de relevo são porções da superfície terrestre que possuem similaridades em formas, processos, gênese e outros fatores que não estão diretamente representados em um MDE. Em outras palavras, fazendo uma analogia ao sensoriamento remoto óptico, unidades de relevo não são tão evidentes em MDEs como, por exemplo, talhões agrícolas ou florestais são em imagens orbitais ou suborbitais (DRAGUT; EISANK, 2011).

Alguns procedimentos podem ser tomados para o reconhecimento e agrupamento de feições geomorfológicas em MDEs. Para alguns autores, a

utilização de segmentos (abordagem baseada em objetos) para agregação ou desagregação de unidades de relevo é superior à abordagem local (“*pixel-a-pixel*”), pois permite a integração da informação, caracterização contextual, topológica e articulação de feições em múltiplas escalas (BISHOP et al., 2012). Dragut e Eisank (2011) consideram que valores de *pixels* não podem ser direta e isoladamente associados às feições de relevo. Portanto, o tratamento de dados de MDE independente de seu contexto espacial pode gerar ruídos que limitam as abordagens locais de classificação de feições do relevo. Dessa forma, para fins de mapeamento, é necessário integrar a informação contínua da superfície do terreno dentro de entidades isoladas (poligonais), ou unidades de mapeamento, para análise de determinados aspectos da distribuição de suas características geomorfométricas.

No processo de regionalização de variáveis locais, o conjunto de valores internos de cada unidade de mapeamento é reduzido a um único valor que representa a distribuição da variável (e.g., média) ou outras medidas de interesse (máximo, mínimos, modas, etc.), conforme a aplicação pretendida. Transformações dos dados originais podem ser necessárias para aproximar sua distribuição à normalidade (CSILLIK et al., 2015), sobretudo para a regionalização de variáveis como declividade e dissecação vertical (BANDURA et al., 2015), que apresentam distribuição assimétrica. Outras transformações podem ser aplicadas aos dados originais para adequar seu significado à expressão regional, como o uso de valores absolutos de curvatura (convexos ou côncavos indistintos) (VALERIANO; ROSSETTI, 2017).

De acordo com Dent e Young (1981), há diferenças entre unidades taxonômicas e unidades de mapeamento. Segundo estes autores, a unidade taxonômica seria uma forma de delimitação conceitual, enquanto que unidades de mapeamento não se encaixam em conceituações e, por isso, devem ser delimitadas por alvos que sejam os mais homogêneos possíveis. Além disso, as unidades de mapeamento de relevo possuem relação direta com a escala. Para aplicações de MDEs em mapeamentos de escalas regionais, muitas

vezes são necessários procedimentos de degradação e generalização da informação derivada de um MDE (HENGL, 2006).

A delimitação de unidades de mapeamento pode ser obtida em SIG com técnicas de segmentação. De acordo com Minár e Evans (2008), a comparação de diferentes abordagens para segmentação do relevo evidencia feições em comum, o que permite o desenvolvimento de uma ampla base teórica para caracterização e delimitação. A homogeneidade interna (que também deve ser relativa a cada escala) e contraste externo dos segmentos em termos de geometria devem refletir suas gêneses e dinâmicas recentes. Desta forma, as variáveis geomorfométricas a serem utilizadas para criação dos segmentos devem corresponder ao máximo com os pressupostos de teorias e modelos geomorfológicos associados às unidades de relevo existentes na área estudada.

Para regionalização de dados locais de altitude, declividade, curvatura vertical absoluta e relevo relativo da planície sedimentar da Amazônia Central, Valeriano e Rossetti (2017) estabeleceram as unidades de terreno com técnicas de segmentação baseadas na homogeneidade da altitude. Nesse trabalho, as unidades delimitadas refletiram a disposição dos pacotes sedimentares individuais, uma vez que os processos de deposição ocorrem em estratos de mesma altitude. Nesse sentido, a altimetria se mostrou uma variável interessante para discriminar terrenos com idades geológicas distintas. Valeriano e Rossetti (2017) combinaram diversas operações de generalização (filtragens, simplificação dos dados e classificações) em torno da segmentação para promover o agrupamento de segmentos em unidades adequadas às feições de interesse, em testes avaliados com supervisão visual dos resultados. Os segmentos foram formados de modo a delinear as menores feições de interesse da área (terraços fluviais). Assim, as feições maiores (interflúvios do planalto sedimentar) são delineadas em fase posterior, pelo reagrupamento dos segmentos de acordo com critérios escolhidos independentemente daqueles usados na operação de segmentação.

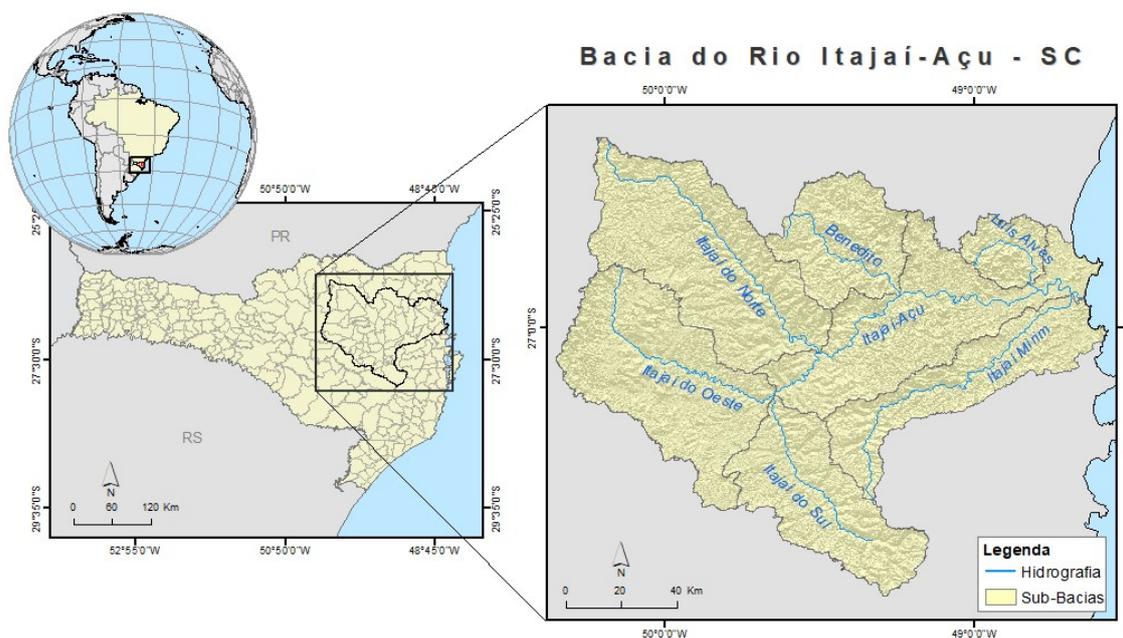
Em um contexto geológico diferente, para o mapeamento morfoestrutural da região montanhosa de *Western Carpathians*, Bandura et al. (2015) elaboraram unidades de terreno utilizando a declividade e dissecação vertical como dados para segmentação. Na metodologia apresentada por Bandura et al. (2015), o processo de segmentação foi realizado por meio do algoritmo de segmentação multirresolução presente no software e-Cognition, cuja operação envolve como parâmetros o tamanho dos segmentos (chamado no software como *escala*), a forma e a compacidade. O parâmetro escala afeta diretamente o tamanho dos segmentos formados, um aspecto crucial para delimitação de unidades adequadas ao estudo do relevo. Estes autores definiram este parâmetro por meio de uma ferramenta desenvolvida por Dragut et al. (2014) que avalia a variância intra-segmento e entre-segmentos, chamada *Estimation of scale parameter 2* (ESP2).

Entende-se dessa forma que diversas abordagens podem ser utilizadas para a delimitação de unidades de mapeamento e regionalização de variáveis geomorfométricas. Existem algoritmos que realizam automaticamente a delimitação de unidades de mapeamento tais como algoritmos de segmentação e de extração de bacias, bem como ferramentas que auxiliam na escolha de melhores parâmetros para esses algoritmos. No entanto, observa-se que a interpretação visual ainda se faz presente e necessária para a análise e avaliação dos dados, não podendo ser totalmente substituída por esses mecanismos.

3 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo (Figura 3.1) possui cerca de 15.000 km² e compreende a bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu, localizada no nordeste do Estado de Santa Catarina, entre as longitudes 50°11'53" W e 48°36'54" W e latitudes 26°22'33" S, 27°52'32" S. O rio principal da bacia, que lhe confere o nome, é constituído pelo encontro dos rios Itajaí do Oeste e Itajaí do Sul (SANTOS e FRANK, 2006). Devido sua extensão, esta bacia é considerada a maior inteiramente catarinense (RIBAS JR., 2005), sendo também a maior bacia da vertente litorânea (rios no sentido oeste – leste) do estado. Muitos municípios inseridos nesta bacia são frequentemente atingidos por inundações, fluxos torrenciais e movimentos de massa, gerando anualmente inúmeros prejuízos para a sociedade.

Figura 3.1 - Mapa de localização da bacia do rio Itajaí-Açu (SC).



Fonte: Mapa compilado pelo autor a partir de dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2006) e Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina (EPAGRI/CIRAM, 2017).

3.1 Clima e Hidrografia

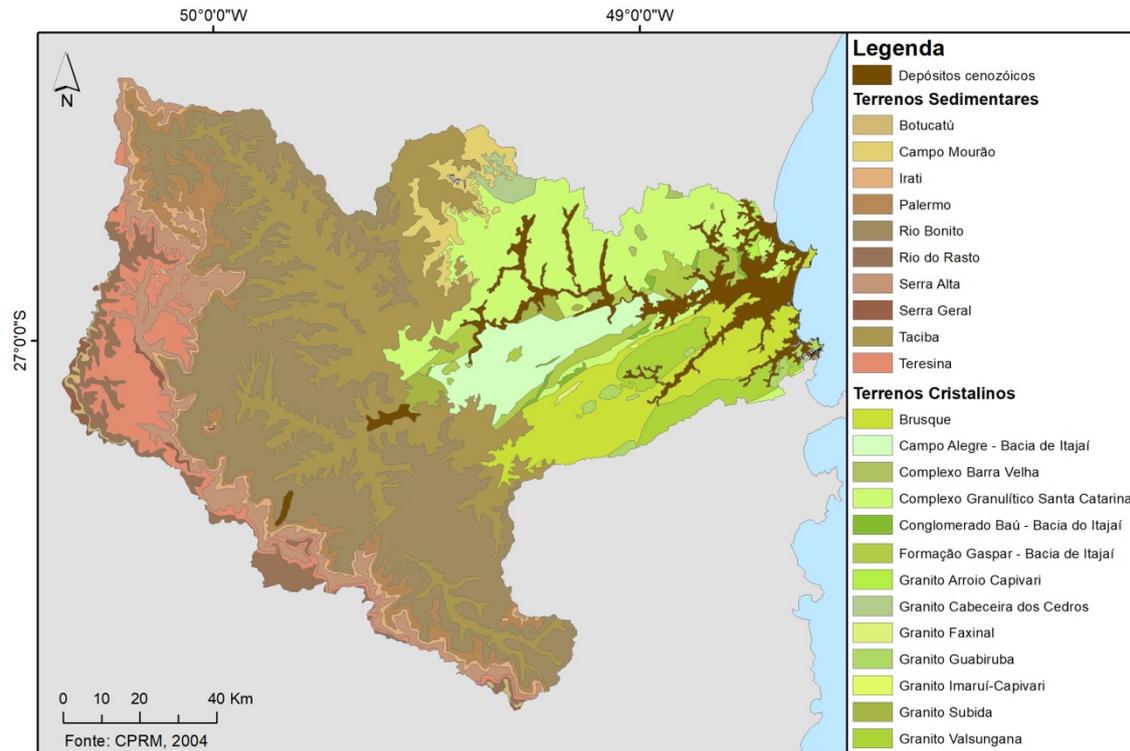
O clima da bacia, segundo a classificação de Köppen, é subtropical, com verões quentes (Cfa) e chuvas bem distribuídas ao longo do ano. Segundo dados da estação pluviométrica de Blumenau/SC, o mês de janeiro é o mais quente e chuvoso, com média de precipitação de 191,9 mm e de temperatura de 24,5° C. O mês de julho, por outro lado, apresenta as menores médias de precipitação e temperatura, com 63,4mm e 15,6° C, respectivamente (SANTA CATARINA, 1986). De acordo com Monteiro (2001), as frentes frias, a umidade advinda do Oceano Atlântico sul, os vórtices ciclônicos e a zona de convergência do Atlântico sul (ZCAS) são, dentre outros, os principais sistemas atmosféricos responsáveis pelas chuvas na região litorânea catarinense, onde se localiza a bacia do rio Itajaí-Açu.

Em função de chuvas abundantes e bem distribuídas ao longo do ano, a bacia do rio Itajaí-Açu possui rios perenes e rede de drenagem densa, porém com variações locais devido às configurações geológicas. O padrão geral de drenagem é dendrítico, principalmente nos leitos de menor ordem, os quais, em alguns casos, possuem nascentes em altitudes superiores a 1000m. Em algumas partes, os cursos d'água seguem lineamentos estruturais.

3.2 Geologia

A geologia da área de estudo é diversificada e complexa, possuindo desde rochas formadas há pelo menos 2 bilhões de anos (SILVA, 1987), como as do Complexo Granulítico de Santa Catarina (HARTMANN et al. 1979), até sedimentos recentes. Os terrenos mais antigos já passaram por diversos eventos tectônicos, que resultaram em intensos cisalhamentos. A área de estudo pode ser dividida em três unidades litoestratigráficas principais: 1) embasamento cristalino, 2) sequência sedimentar Gondwânica da Bacia do Paraná e 3) depósitos cenozóicos (SANTA CATARINA, 1986; CPRM, 2004; MARIMON; WILDNER; AYALA, 2014). A Figura 3.2 apresenta o mapa geológico da bacia elaborado pela CPRM (2004).

Figura 3.2 - Mapa geológico da bacia do rio Itajaí-Açu.



Fonte: Mapa compilado pelo autor a partir de dados da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais(CPRM, 2004).

As rochas cristalinas formam o embasamento litológico do Estado de Santa Catarina (MARIMON; WILDNER; AYALA, 2014). Na porção que se localiza a bacia do rio Itajaí-Açu, encontram-se rochas de idade Arqueana (mais de 2,5 B.a.) a Proterozóica (de 500 M.a. a 2,5 B.a) com destaque para granitos, gnaisses, quartzitos, rochas ultramáficas, granulitos, gnaisses granulíticos, xistos, metapelitos, metapiroxenitos, metagabro, riolitos, arcóseos, arenitos, milonitos e cataclasitos (SANTA CATARINA, 1986; CPRM, 2004; MARIMON; WILDNER; AYALA, 2014). Na porção do embasamento cristalino da área de estudo prevalecem:

1) coberturas vulcanossedimentares, como a bacia vulcanossedimentar do Itajaí, que consiste em arenitos, siltitos e outras rochas sedimentares intercaladas a tufos, brechas, basalto e diques riolíticos derivados e vulcanismo (SILVA, 1987);

2) complexos metavulcanossedimentares, como o de Brusque, composto por rochas metamórficas de baixo grau, como micaxisto, metarenitos, quartzitos, sequências vulcanometamórficas ácidas e básicas e outras (MARIMON; WILDNER; AYALA, 2014);

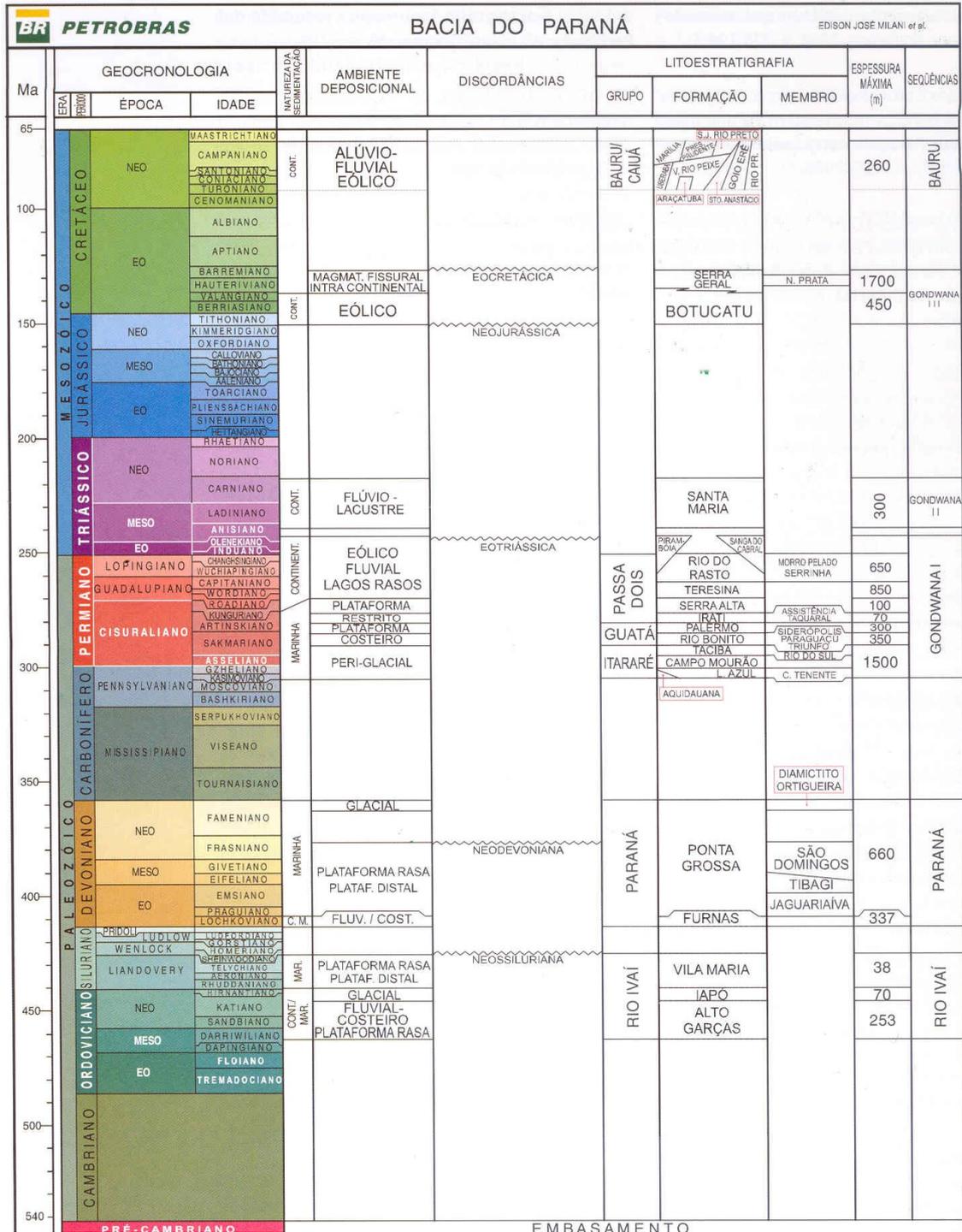
5) complexo granulítico de Santa Catarina, também denominado de Cráton Luís Alves, com rochas variando entre 2,6 bilhões de anos até 1 milhão de anos. Neste complexo ocorrem, ainda, gnaisses e quartzitos do complexo Luís Alves e rochas do complexo Máfico-Ultramáfico (SIGA JÚNIOR, 1995; FORNARI, 1998; MARIMON; WILDNER; AYALA, 2014).

6) suítes granitóides, que se apresentam como intrusões nas unidades anteriormente descritas. Na área de estudo ocorrem ainda a suíte intrusiva Valsungana, a suíte intrusiva Guabiruba (~550 milhões de anos), e a suíte intrusiva Subida possui idade ordoviciana (500 a 435 Ma) (SILVA, 1987).

As rochas que compõem a sequência Gondwânica da bacia sedimentar do Paraná possuem idade entre 120 e 435 M.a. e estão localizadas no oeste da área de estudo, na região do Planalto Centro-Oriental de Santa Catarina. A litologia desta porção é predominantemente composta por basalto, dacitos, folhelhos, argilitos, siltitos, arenitos, ritmitos, calcários, conglomerados entre outras rochas sedimentares fanerozóicas (CPRM, 2004).

Localizadas na borda leste da Bacia do Paraná, as primeiras formações Gondwânicas que fazem limite com os afloramentos do embasamento cristalino são Taciba e Campo Mourão, pertencentes ao Grupo Itararé. A oeste, afloram rochas correspondendo às formações: Rio Bonito, Palermo, Irati, Teresina, Serra Alta, Rio do Rasto, Botucatu e por fim, em um pequeno trecho do limite extremo oeste da bacia, rochas basálticas da Formação Serra Geral (Figura 3.3).

Figura 3.3 - Carta estratigráfica da bacia sedimentar do Paraná. As rochas que afloram na bacia hidrográfica do Itajaí-Açu se iniciam no Grupo Itararé.



Fonte: Milani et al. (2007).

A Formação Campo Mourão corresponde a uma sequência flúvio-marinha, com influência glacial. As rochas de maior predominância são arenitos finos a

grosseiros. A formação Taciba é constituída por sedimentos glácio-marinhos do tipo folhelhos, argilitos, arenitos finos e diamictitos. A formação seguinte corresponde a Rio Bonito que possui sedimentos de origem flúvio-deltáica a litorânea representados por arenitos, argilitos, siltitos e folhelhos. A formação Palermo corresponde a depósitos marinhos intensamente bioturbados representados por siltitos arenosos. A formação Irati, também corresponde a depósitos marinhos com siltitos, folhelhos e argilitos. A formação Serra Alta é igualmente formada por depósitos de origem marinha representados por argilitos, folhelhos e siltitos com lentes e concreções calcíferas. A formação seguinte, Rio do Rasto, apresenta depósitos de planícies costeiras (porção inferior) e depósitos fluviais (porção superior) cujas rochas são representadas por siltitos, siltitos calcíferos, argilitos e arenitos finos com fragmentos calcíferos (SILVA, 1979).

O regime deposicional e climático que ocasionou as formações acima comentadas sofreu uma interrupção, no decorrer do Mesozóico, iniciando assim a deposição eólica da formação Botucatu (SANTA CATARINA, 1986). Tal formação ocorreu em um período desértico (deserto Botucatu), marcando o clímax da aridez desértica nos terrenos onde hoje se encontra a bacia de estudo (MARIMON; WILDNER; AYALA, 2014). De acordo com Silva (1979), nesta formação afloram arenitos finos a médios, com estratificações cruzadas de médio a grande porte. Com maior frequência na base da formação, podem encontrados depósitos lacustres isolados compreendendo a arenitos argilosos mal selecionados (SILVA, 1979).

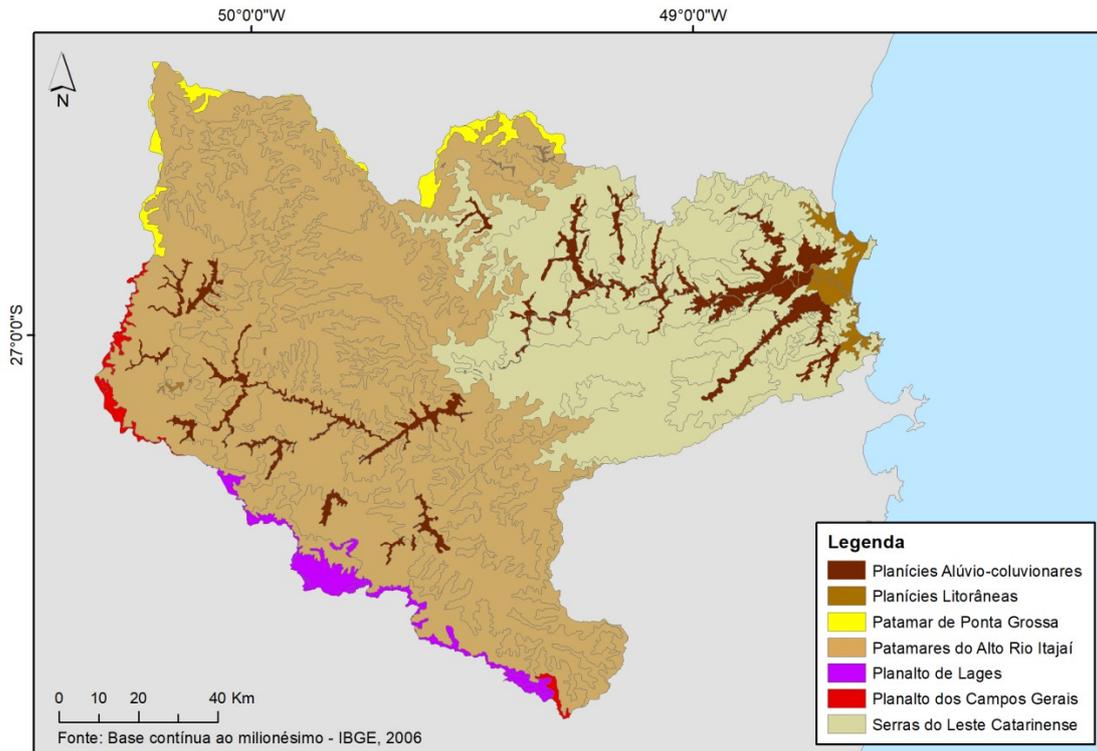
Apenas em um pequeno trecho dos divisores oeste da bacia do rio Itajaí-Açu, afloram rochas derivadas dos derrames vulcânicos da Formação Serra Geral. Elas correspondem às primeiras manifestações vulcânicas sobre os sedimentos arenosos do então deserto Botucatu (MARIMON; WILDNER; AYALA, 2014). Estas rochas são representadas em predominantemente por basaltos e basalto-andesitos (SILVA, 1979; MARIMON; WILDNER; AYALA, 2014). Esta formação corresponde à última da bacia do Paraná.

Os depósitos cenozóicos são encontrados principalmente em planícies fluviais e litorâneas, com sedimentos variando de conglomerados a argilitos (CPRM, 2004). Nas planícies fluviais são encontrados sedimentos aluvionares inconsolidados, cuja origem de muitos deles está ligada ao rebaixamento do nível de base durante o Quaternário (SANTA CATARINA, 1986; CPRM, 2004). Destacam-se, também, depósitos de tálus e/ou colúvio e materiais residuais derivados tanto do embasamento cristalino, quanto de rochas sedimentares da Bacia do Paraná (MUÑOZ, 2014). Na zona litorânea encontram-se sedimentos siltico-argilosos e areias finas quartzosas de origem marinha e/ou transicional, derivados principalmente de oscilações oceânicas do Quaternário e processos flúvio-marinhos relacionados (CPRM, 2004, MARIMON; WILDNER; AYALA, 2014).

3.3 Geomorfologia

O clima subtropical úmido da área de estudo, somado à constituição mineralógica de algumas rochas (onde muitas estão associadas a intensos fraturamentos), resultaram em mantos de alterações profundos em algumas áreas. Tal configuração condicionou em diferentes porções da bacia relevo com alto grau de dissecação.

Figura 3.4 - Mapa geomorfológico da bacia do rio Itajaí-Açu.



Fonte: Mapa compilado pelo autor a partir de dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2006).

A geomorfologia da bacia do Itajaí-Açu, segundo o mapeamento do RADAMBRASIL (Figura 3.4), pode ser dividida em três domínios morfoestruturais, seis regiões geomorfológicas e sete principais unidades geomorfológicas, sendo estas: Planícies Litorâneas, Planícies Alúvio-coluvionares, Patamar de Mafra, Patamares do Alto Rio Itajaí, Planalto de Lages, Planalto dos Campos Gerais e Serras do Leste Catarinense (SANTA CATARINA, 1986).

Na área de estudo, as planícies litorâneas formadas por sedimentos flúvio-marinhos concentram-se nas áreas adjacentes ao Oceano Atlântico. Nesta unidade geomorfológica destaca-se a planície criada pelos meandros do rio Itajaí-Açu pouco antes de sua foz. As maiores altitudes localizam-se a oeste, em terraços mais interiores, próximos ao contato com outras unidades geomorfológicas, como a Serra do Tabuleiro-Itajaí (SANTA CATARINA, 1986).

As planícies alúvio-coluvionares possuem modelados em superfícies planas a convexas, com leve rampeamento em direção ao litoral (SANTA CATARINA, 1986). Nos sopés das encostas ocorrem sedimentos grossos que gradam a mais finos em direção ao litoral.

Somente o limite sul do Patamar de Mafra situa-se na área de estudo. Este patamar forma uma escarpa, a qual representa os divisores noroeste a norte da bacia do rio Itajaí-Açu. Nesta unidade predomina relevo tabular, onde as maiores amplitudes altimétricas se encontram próximas aos Patamares do Alto Rio Itajaí. Ainda, onde afloram rochas menos resistentes ao intemperismo, como folhelhos, siltitos e argilitos, o relevo é colinoso (baixa declividade) e com topos levemente alongados (LUIZ, 2014).

A borda oeste da unidade do Planalto dos Campos Gerais também é um dos divisores d'água da área de estudo, situando-se nos limites oeste e em uma porção isolada no extremo sudoeste da bacia. Esta unidade está distribuída em diversos blocos separados uns dos outros e apresenta tanto porções dissecadas pelos rios quanto superfícies elevadas e pouco escavadas (LUIZ, 2014).

A borda nordeste da unidade geomorfológica Planalto de Lages é o principal divisor da porção sudoeste da bacia. Esta unidade forma um degrau entre o Planalto dos Campos Gerais (mais elevado) e os patamares do Alto Rio Itajaí (menos elevado) (LUIZ, 2014). O Planalto de Lages tem formas predominantemente colinosas com dissecação leve e constante, cuja homogeneidade é localmente interrompida por morros testemunhos (SANTA CATARINA, 1986).

Situando-se no oeste da bacia, os Patamares do Alto Rio Itajaí é a unidade geomorfológica mais expressiva da área de estudo, com cerca de 9.300 km². Esta unidade é modelada em rochas sedimentares com estrutura concordante horizontal a sub-horizontal e apresenta expressiva dissecação por rios de vales profundos (LUIZ, 2014). Em algumas áreas os rios se mostram fortemente encaixados no relevo, em outras, situadas mais ao centro desta unidade,

predominam vales abertos formando planícies. A leste, as formas de relevo predominantes são chapadas sustentadas por arenitos e encostas com patamares estruturais (degraus) derivados da erosão diferencial, cujas camadas mais resistentes (arenito) formam linhas de cornijas ao longo dos vales. A oeste o relevo é menos dissecado, ocorrendo morros e colinas com topos alongados e encostas suaves (LUIZ, 2014).

Por fim, as Serras do Tabuleiro – Itajaí, também denominadas de Serras do Leste Catarinense, ocupam cerca de 4.500 km² da área de estudo, sendo a segunda maior unidade geomorfológica dentro da bacia. Seu limite oeste é a unidade dos Patamares do Alto Rio Itajaí e a leste são as Planícies Alúvio-coluvionares e Litorâneas.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Dados

O dado utilizado para delimitação da bacia do rio Itajaí-Açu foi retirado do Mapeamento de Unidades Hidrográficas de Santa Catarina, disponibilizado na mapoteca do Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina - EPAGRI/CIRAM. O mapeamento das unidades hidrográficas deste projeto foi realizado a partir de uma base de dados com escala de 1:50.000 e 1:100.000 (CIRAM, 2017).

Os dados base utilizados nos processamentos deste trabalho foram os seguintes produtos fornecidos no banco de dados geomorfométricos Topodata (<http://www.dsr.inpe.br/topodata/>): altitude (metros), declividade (percentagem), curvatura vertical (graus por metro), forma de terreno (9 classes) e relevo sombreado. Para abranger toda a extensão da área de estudo, foram utilizadas as quadrículas Topodata correspondentes às folhas SG-22-Z-A, SG-22-Z-B, SG-22-Z-C e SG-22-Z-D na articulação em 1:250.000 de acordo com o Sistema Cartográfico Brasileiro.

Para avaliações dos resultados foram utilizados como planos de informações (formato vetorial) os seguintes mapas: 1) geomorfológico em escala 1:250.000 derivado do projeto RADAMBRASIL, disponibilizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) pelo endereço <https://mapas.ibge.gov.br>; e 2) geológico em escala 1:1.000.000 realizado pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), disponibilizado no portal GEOBANK-CPRM (CPRM, 2004), correspondente à carta SG-22 (Curitiba).

Além disso, para verificações locais foram utilizadas imagens orbitais de alta resolução espacial disponibilizadas pelo Google Earth (GOOGLE, 2017), bem como imagens coletadas a nível terrestre disponibilizadas pelo módulo *Street View* do *Google Earth*.

4.2 Recursos de geoprocessamento

Os principais *software* utilizados para os processamentos foram:

- a) Sistema de Informações Geográficas ArcGIS 10 (ESRI, 2011) para geoprocessamento de dados e elaboração de *layouts*;
- b) *eCognition 9.0* (TRIMBLE, 2014) para criação de unidades de mapeamento por meio de segmentação;
- c) R: *The R Project for Statistical Computing* (R Core Team, 2013) para processamentos, análises estatísticas e produção de gráficos;
- d) *Global Mapper 17* (<http://www.globalmapper.com>) para geoprocessamento de dados, conversões de formatos e elaboração de perfis topográficos;
- e) *Google Earth* (GOOGLE, 2017) para visualização de imagens orbitais e terrestres da área de estudo.

4.3 Metodologias aplicadas ao mapeamento

O processamento principal consistiu nas seguintes etapas: geração de variáveis complementares, partição do terreno em segmentos (criação de unidades de mapeamento) e classificação dos segmentos. Esses procedimentos estão descritos em meio às diversas etapas do mapeamento, visto que constituem operações indissociáveis dos processos de interpretação.

Anteriormente à manipulação dos dados Topodata e geração de novas variáveis geomorfométricas, os dados originais disponibilizados por esse banco de dados foram subamostrados da resolução de 1" (~30m) para a de 3" (~90m). Esse procedimento teve como objetivo reduzir o volume de dados e favorecer os processos de regionalização e de derivação regional. O processo de subamostragem aplicado consiste na seleção do pixel central de cada célula 3x3 do MDE (assim como dos demais planos de informação de dados geomorfométricos do Topodata), resultando diretamente na degradação da

resolução espacial sem novos cálculos de interpolação. Uma vez oriundo do MDE-Topodata, o MDE resultante se difere do original SRTM-3" (USGS, 2003) devido à sua preparação por krigagem (VALERIANO;ROSSETTI, 2012).

As metodologias de análise de dados geomorfométricos para o mapeamento de feições do relevo foram elaboradas em três níveis de detalhe, também chamados de níveis hierárquicos ou táxons. Os processos de segmentação foram realizados de forma diferente ao longo do mapeamento conforme as condições de relevo envolvidas em cada de análise. Para as classificações dos segmentos (unidades de mapeamento), foram testadas diferentes derivações topográficas (variáveis geomorfométricas), técnicas de processamento e parâmetros. Neste trabalho, são relatados os procedimentos que geraram os resultados mais aderentes às características geomorfométricas observadas na bacia estudada.

A classificação do primeiro táxon, compatível aos domínios morfoestruturais mapeados no RADAMBRASIL, foi realizada considerando a escala de 1:1.000.000. Nesse nível mais geral, foi elaborada uma metodologia para o mapeamento de três classes de relevo: Planícies, Terrenos Cristalinos e Terrenos de Coberturas Sedimentares Fanerozóicas, as quais estão associadas respectivamente aos domínios de DQS (Depósitos Quaternários Sedimentares), CN (Crátons Neoproterozóicos) e BCSF (Bacias e Coberturas Sedimentares Fanerozóicas) mapeados pelo RADAMBRASIL. Por se tratar da determinação de apenas três padrões, essa etapa de classificação do primeiro táxon teve um grau maior de complexidade e por isso necessitou também processos metodológicos de desenvolvimento mais extensos.

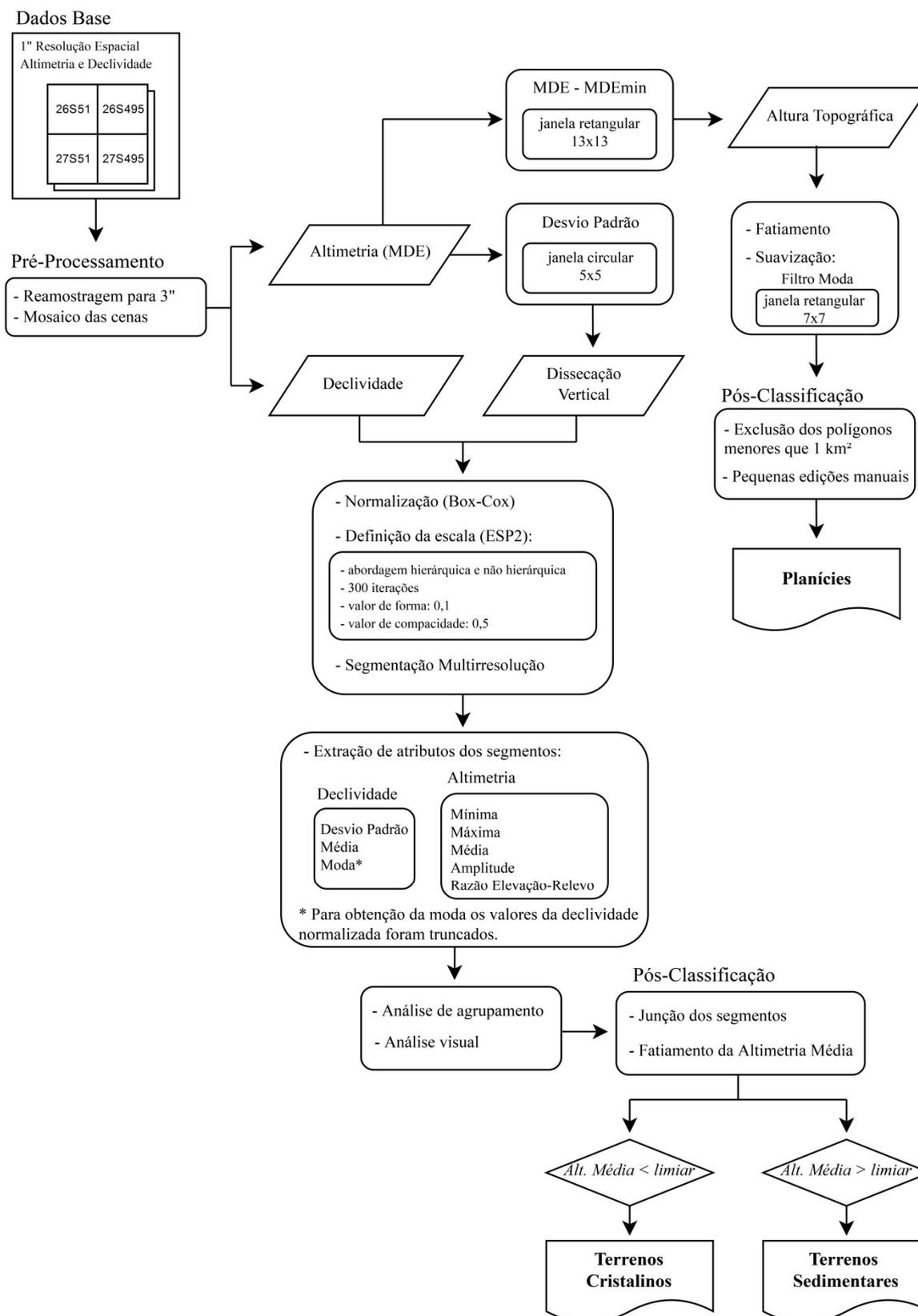
O mapeamento do segundo nível hierárquico correspondeu a uma escala mais detalhada que o primeiro táxon. Nessa etapa foram definidos subgrupos dentro dos grandes grupos de terrenos cristalinos e sedimentares fanerozóicos mapeados a partir dos procedimentos do táxon 01. Por fim, no terceiro nível hierárquico, mapeou-se um novo subgrupo dentro da classe de terrenos sedimentares e dois subgrupos dentro da classe de terrenos cristalinos.

Adicionalmente, as análises nesse nível permitiram realizar um refinamento da classe de planícies da porção cristalina da bacia.

4.3.1 Primeiro nível hierárquico

Para o mapeamento das feições deste nível hierárquico realizou-se a classificação das feições correspondentes às planícies de forma independente aos outros dois domínios morfoestruturais, os quais foram mapeados concomitantemente. A Figura 4.1 apresenta o fluxograma detalhado das etapas realizadas nesta parte do trabalho.

Figura 4.1 - Fluxo metodológico para classificação das feições referentes ao primeiro táxon.



Fonte: Produção do autor.

4.3.1.1 Planícies

Pelo fato das planícies possuírem expressão espacial muito distinta no MDE e seus derivados do que os demais tipos de terreno, o mapeamento desta classe foi realizado de forma isolada das demais. Para a classificação das planícies foram realizados testes envolvendo a análise de variáveis relacionadas às características gerais de planícies, tais como declividade, altimetria e curvatura. Os testes realizados nesta etapa do trabalho mostraram a altura topográfica como atributo de melhor desempenho para a identificação de áreas de planície, numa confirmação do trabalho de Muñoz (2014) feito na mesma área.

A altura aplicada ao delineamento de planícies foi calculada como a elevação do MDE subtraída da altimetria mínima num raio de busca. Foram testados diferentes raios de busca (definidos pelo tamanho de janelas móveis) para o estabelecimento das altitudes mínimas, adotando-se por fim uma janela móvel circular de aproximadamente 1,2km (13x13 pixels). Da mesma forma, a altura de 13m foi observada como nível máximo existente nas áreas de planícies e assim adotada para fatiamento. Evidentemente, pequenas áreas próximas a talvegues inscritos em morros e a outros pontos de altitude mínima local também apresentaram alturas abaixo de 13m, não se constituindo, porém, em uma estrutura de planícies compatível com a escala de estudo. Para estes casos foi realizado um procedimento de exclusão dessas áreas por critério de contiguidade espacial, realizando-se a aplicação de filtro moda (7x7). Uma vez que planícies constituem áreas contíguas, a seleção local de alturas baixas (fatiamento) por si foi capaz de produzir unidades de mapeamento (polígonos) diretamente, sem a necessidade de técnicas de segmentação.

4.3.1.2 Terrenos sedimentares e cristalinos

A classificação dos terrenos de coberturas sedimentares fanerozóicas e embasamento cristalino foi realizada simultaneamente. Nessa etapa, utilizou-se a abordagem de classificação por objetos (DRAGUT; EISANK, 2011), considerando o preceito de unidades de mapeamento sugerido por Dent e Young (1981).

Após diversos testes iniciais de segmentação, optou-se por utilizar a metodologia sugerida por Bandura et al. (2015) para geração de unidades de mapeamento, em que foram utilizadas a declividade e dissecação vertical normalizadas como dados de entrada na segmentação. A definição de valores de tamanho dos segmentos foi realizada por meio de cálculos estatísticos.

A dissecação vertical, variável que destaca a amplitude da ondulação do terreno, foi gerada por meio da extração do desvio padrão da altimetria considerando um raio de busca de aproximadamente 450m (janela móvel circular com tamanho 5x5).

Em etapa anterior à obtenção das unidades de mapeamento (segmentos), a dissecação vertical e a declividade do Topodata convertida para graus passaram por uma transformação numérica a fim de aproximar os valores a uma distribuição normal (Gaussiana), procedimento este sugerido por Eisank et al. (2014). Esta operação foi realizada por meio da ferramenta *Transformation (normalization) tool*, desenvolvida por Csilliket al. (2015). Este *toolbox* indica a transformação mais adequada para a minimização da assimetria (*skewness*) presente em variáveis como a declividade e para a atenuação da curtose (*kurtosis*) de variáveis geomorfométricas como a curvatura horizontal e vertical. Para distribuições assimétricas e com curtose, Eisank et al. (2014) sugerem a transformação Box-Cox e arcotangente, respectivamente. Neste sentido, pelo fato da dissecação vertical possuir distribuição assimétrica muito semelhante à declividade, a transformação Box-Cox foi aplicada em ambas as variáveis.

A individualização dos objetos foi realizada por meio do algoritmo de segmentação multirresolução presente no programa eCognition Developer 9.0. Este algoritmo utiliza três parâmetros para segmentação: tamanho (chamado de escala no algoritmo), forma e compacidade. Dentre eles, destaca-se a importância do parâmetro de tamanho pelo fato de controlar a dimensão dos segmentos a serem produzidos.

Existem alguns métodos que estimam os valores de tamanho de segmento estatisticamente ideais por meio de testes de variância entre e intra segmentos. Dentre estes métodos, pode-se citar a ferramenta *Estimation of scale*

parameter 2 (ESP2), desenvolvida por Dragut et al. (2014), a qual foi utilizada neste trabalho. Esta ferramenta calcula o valor de três níveis de tamanho com base no cálculo da variância local dos segmentos de modo que a variância interna de um segmento seja menor do que a variância entre os segmentos vizinhos. Para a definição do tamanho, os parâmetros de forma e compacidade foram mantidos na configuração *default* (padrão) do programa, 0.1 e 0.5, respectivamente. O cálculo da variância entre os segmentos foi feito com 300 iterações e pesos iguais para ambas as variáveis de declividade e dissecação vertical normalizadas. Neste trabalho, utilizou-se a abordagem hierárquica de segmentação, a qual considera uma relação de dependência dos segmentos menores com os maiores (super segmentos). Os três níveis de segmentação obtidos com os diferentes valores de tamanho foram analisados visualmente.

Após a escolha do resultado de segmentação mais satisfatório, em cada unidade de mapeamento foram calculadas as seguintes variáveis regionais: altimetria mínima, altimetria máxima, média altimétrica, amplitude altimétrica e razão elevação-relevo. Também foram extraídos de cada segmento os valores de média, desvio padrão e a moda da declividade normalizada (totalizando 08 intervalos de um em um grau). A distribuição contínua dos valores da declividade normalizada foi discretizada por meio de truncamento para extração da moda.

Para uma averiguação preliminar do comportamento dos atributos, foi realizada classificação não-supervisionada, por meio de análise de agrupamento de cada variável individualmente. Apesar de existir conhecimento prévio das classes morfoestruturais na bacia, tal processo permitiu avaliar as possíveis similaridades com os mapas geomorfológico e geológico pré-existentes. A análise de agrupamento foi realizada a partir de uma abordagem hierárquica. Os grupos foram gerados pelo método 'ward.D' da função 'hclust' do pacote 'Stats' do software R (<https://www.r-project.org/>). Para melhor observar a disposição espacial e a variação entre os resultados gerados com as diferentes variáveis, optou-se por gerar 05 grupos por variável, considerando a possibilidade de posteriores reagrupamentos. Os agrupamentos foram avaliados visualmente e, com isto, definiu-se a variável com maior aderência

aos mapas de referência, bem como às características morfológicas dos dois domínios morfoestruturais. As áreas de planícies, classificadas anteriormente e de forma isolada, foram excluídas desta análise.

Os segmentos da variável selecionada que possuíam contiguidade espacial e que pertenciam ao mesmo grupo foram unidos, de modo a constituírem entidades espaciais únicas e de maior tamanho (*'super segmentos'*). Foi observado que as altitudes médias desses super segmentos se distribuíam acima ou abaixo de um determinado limiar. Esta diferença de média altimétrica entre os super segmentos permitiu a distinção entre os dois domínios por um critério de fatiamento simples. Os polígonos com média altimétrica superior a 400 metros foram classificados como terrenos sedimentares e os polígonos com média altimétrica inferior a este valor foram classificados como terrenos cristalinos.

4.3.2 Segundo nível hierárquico

Neste nível hierárquico foram analisados possíveis subgrupos tanto nos terrenos cristalinos, quanto nos sedimentares fanerozóicos. A partir da observação visual das variáveis geomorfométricas, constatou-se a existência de dois padrões principais no grupo do embasamento cristalino: 1) grupos com maiores declividades e com textura mais grosseira, chamados de terrenos montanhosos e, 2) grupos com declividades menos expressivas e textura mais fina, chamados de terrenos ondulados a forte ondulados. Nos terrenos sedimentares fanerozóicos, também se considerou a existência de dois padrões: 1) grupos com alta declividade e dissecação, chamados de terrenos dissecados, e 2) grupos com declividade mais suave, com presença de relevos tabulares e áreas planas, chamados de terrenos suave ondulados.

4.3.2.1 Terrenos cristalinos ondulados a forte ondulados e montanhosos

Como esta etapa do trabalho buscou a obtenção de um grau de detalhamento superior, uma nova segmentação foi realizada de modo a obter unidades de

mapeamento menores. Neste procedimento foram empregados os mesmos dados de entrada que os anteriores (declividade e dissecação vertical normalizadas), pelo fato destes destacarem bem as variações de textura dos terrenos, variável cujo padrão observado visualmente foi a que melhor demonstrou diferenças entre os terrenos. Na segmentação, os parâmetros de forma e compacidade também foram mantidos nas mesmas configurações que a segmentação do primeiro táxon (forma = 0.1 e compacidade = 0.5). Entretanto, como o intuito era gerar segmentos com tamanhos menores, após diversos testes, optou-se por utilizar um fator tamanho (ou escala, conforme denominado no software) igual a 13.

Após os testes de regionalização das diferentes variáveis geomorfométricas nos segmentos, considerou-se a textura de relevo como o dado mais satisfatório para classificação dos dois subgrupos existentes nos terrenos cristalinos. A textura de relevo foi calculada a partir da diferença entre o MDE original e o filtrado por média. Para a geração deste MDE expressando as médias, foram utilizadas janelas móveis retangulares com tamanho 15x15, seguidas de nova filtragem por média com janelas de tamanho 17x17.

Entende-se, neste trabalho, que terrenos com textura de relevo (i.e., tamanho dos elementos de um padrão) fina possuem maior quantidade de áreas de topos de morro e fundo de vale por km². A partir disso, realizou-se processo de seleção dos valores de topos de morro e fundo de vale de modo a isolá-los dos valores intermediários, os quais representam segmentos de encostas. Este procedimento tornou possível obter um valor da frequência de topos de morro e interflúvios por segmento, a qual reflete também a distância de interflúvios. Por meio da averiguação de histogramas e análise visual, os intervalos dos valores que representam os fundos de vale e topos de morro foram definidos. Neste sentido, um *raster* binário foi gerado (Figura 4.2), em que os valores de 0 a 150 e de 250 a 504 foram atribuídos como 'zero' (0), correspondendo assim a terrenos com textura fina, e os valores de 150 a 250 foram atribuídos como 'um' (1), correspondendo a terrenos com textura grossa.

Figura 4.2 – *Raster* binário resultante da seleção de valores extremos e intermediários de textura de relevo nos terrenos do embasamento cristalino.



Fonte: Produção do autor.

A partir do *raster* binário da textura do relevo, calculou-se a média de valores 0 e 1 por segmento de modo a obter a frequência de valores extremos (textura fina) em cada polígono. Neste sentido, os polígonos com frequência de valores extremos (classe 0) igual ou superior a 75% foram classificados como terrenos de textura fina (terrenos ondulados a forte ondulados) e os polígonos com frequência de extremos igual ou inferior a 25% foram classificados como terrenos de textura grossa (terrenos montanhosos).

4.3.2.2 Terrenos sedimentares dissecados e suave ondulados

Para a averiguação da existência de subgrupos nos terrenos sedimentares, foram observadas as distribuições espaciais das mesmas variáveis que os terrenos cristalinos. Por se tratar de uma área de geologia sedimentar, após a realização de testes preliminares utilizando variáveis, tais como curvatura vertical e razão elevação relevo, constatou-se que a altimetria foi a variável geomorfométrica mais satisfatória para a definição de unidades de mapeamento neste nível hierárquico. A altimetria também foi considerada por

Valeriano e Rossetti (2017) como a variável mais satisfatória para a criação de unidades de mapeamento na planície sedimentar Amazônica para posterior regionalização geomorfométrica.

Nessa etapa, a abordagem de segmentação multirresolução também foi adotada. Para a definição do tamanho dos segmentos, a ferramenta ESP2 foi novamente utilizada, a partir da qual definiu-se o valor de 175, sendo os outros dois parâmetros (forma e compacidade) mantidos conforme a configuração *default* do programa.

Para a classificação dos dois subgrupos hierarquicamente subordinados ao domínio dos terrenos sedimentares, calculou-se a média da declividade normalizada para cada segmento. Por meio de análise visual dos resultados espacializados, bem como do próprio histograma dos valores médios de declividade, foi definido o limiar de 3,7° para separação dos dois subgrupos: *suave ondulados* (em terrenos planos a pouco declivosos e tabulares) e; *terrenos dissecados* (em terrenos dissecados e com declividade expressiva).

Como o objetivo desta etapa era atender à escala de até 1:500.000, de modo a minimizar o efeito ruidoso da classificação, foi realizado um processo de exclusão de segmentos classificados como declivosos que fossem menores do que 45km².

4.3.3 Terceiro nível taxonômico

Para a classificação das feições relativas ao terceiro táxon, para ambos os compartimentos (embasamento cristalino e terrenos sedimentares fanerozóicos), foram realizados procedimentos para o detalhamento de escarpas isoladas. Ainda, para os terrenos cristalinos, foi possível mapear também uma segunda classe, referente a feições colinosas.

4.3.3.1 Colinas

O mapeamento das colinas foi realizado a partir do plano de informação de formas de terreno. Por se tratar de uma variável derivada da combinação entre as três classes de curvatura horizontal e as três de curvatura vertical, a forma

de terreno pode apresentar 09 possíveis classes qualitativas (Figura 1.1). Ao analisar a forma de relevo (FT) sobreposta ao relevo sombreado, percebeu-se que a associação das formas 7 (terrenos convexos divergentes) e 9 (terrenos côncavos divergentes) correspondem, em muitos casos, a colinas (topos convexos e base côncava). Neste sentido, as classes FT 07 e 09 foram isoladas de modo a representarem as feições colinosas dos terrenos cristalinos. Como nem todas as feições compostas por estas classes de FT correspondem a colinas, alguns critérios foram levados em conta: 1) pertencer a um corpo isolado, ou seja, não pertencer a uma cadeia montanhosa, 2) possuir forma arredondada, e 3) não ser maior que 0,3 km².

4.3.3.2 Escarpas dos terrenos cristalinos

Embora as escarpas sejam associadas a níveis de declividade maiores, a observação dos dados locais adotados (Topodata) evidenciou a necessidade de generalização específica para seu delineamento na extensão e contiguidade típicas dessa feição. Após testes envolvendo diferentes alternativas, percebeu-se que a cálculo da declividade sobre um MDE generalizado (filtragem média 3x3 na resolução de ~90m) resultou desempenho superior àqueles obtidos com a aplicação de filtrações diretamente sobre a declividade local.

O histograma desta nova declividade foi analisado e alguns testes de fatiamento foram realizados até o estabelecimento do limiar de declividade de 17°, acima do qual foram realçados os terrenos mais declivosos do domínio cristalino. Os resultados imediatos deste fatiamento requereram pós-processamento para minimizar os ruídos gerados com a operação de fatiamento, o que foi realizado com filtragem de moda em janelas de 5x5.

4.3.3.3 Escarpas dos terrenos sedimentares

Durante os testes para delimitação das escarpas isoladas, geralmente locais de encontro de duas camadas sedimentares com níveis altimétricos distintos, diferentes técnicas atingiram praticamente os mesmos resultados. Assim, optou-se por adotar o processo mais simples em razão de sua rapidez e replicabilidade. As escarpas pertencentes ao domínio sedimentar foram, então,

mapeadas a partir de uma seleção de valores (fatiamento) da declividade normalizada. Os valores foram escolhidos a partir da aderência às feições observáveis no sombreamento de relevo e em perfis topográficos. O valor de 4,7° da declividade normalizada (correspondendo a cerca de 22°) foi considerado satisfatório para a delimitação das escarpas do domínio sedimentar. Para diminuir o efeito ruidoso (feições muito pequenas e pouco representativas), foi realizada a exclusão de polígonos menores do que 0,20 km².

4.4 Avaliação dos resultados

Processos de avaliação e controle dos resultados, incluindo a seleção de variáveis e processos de análise, foram realizados em todas as etapas metodológicas. Estes processos foram embasados, sobretudo em análise visual, pela semelhança das feições evidenciadas com aquelas observadas nos mapeamentos geomorfológico e geológico e com o conhecimento local.

Somente classes dos domínios morfoestruturais (primeiro nível hierárquico) foram avaliadas por comparação quantitativa em relação ao mapa geomorfológico do RADAMBRASIL. Isso se deve ao fato da escala deste nível hierárquico ser a única compatível com as informações presentes nesse mapa oficial. Para a avaliação, foram realizados dois principais procedimentos: 1) sobreposição e comparação visual; e 2) tabulação cruzada entre a classificação e o mapa geomorfológico do RADAMBRASIL.

Com a tabulação, foram extraídas as áreas totais de acerto (verdadeiro positivo – VP), omissão (falso negativo – FN) e inclusão (falso positivo – FP), a partir das quais foi realizado o cálculo das seguintes métricas: 1) percentual de detecção (Equação 4.1); 2) percentual de omissão (Equação 4.2); e 3) percentual de inclusão (Equação 4.3):

$$\text{Porcentagem de detecção (PD)} = 100 \times \frac{VP}{VP+FN} \quad \text{Eq. (4.1)}$$

$$\text{Porcentagem de erros de omissão (EO)} = 100 - PD \quad \text{Eq. (4.2)}$$

$$\text{Porcentagem de erros de comissão (EC)} = 100 \times \frac{\text{FP}}{\text{VP}+} \quad \text{Eq. (4.3)}$$

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, são apresentados os resultados dos procedimentos de mapeamento dos três níveis hierárquicos propostos. As variáveis e resultados das classificações são apresentadas para cada nível, bem como sua comparação com mapas oficiais, imagens de satélite e o próprio conhecimento local.

5.1 Primeiro táxon

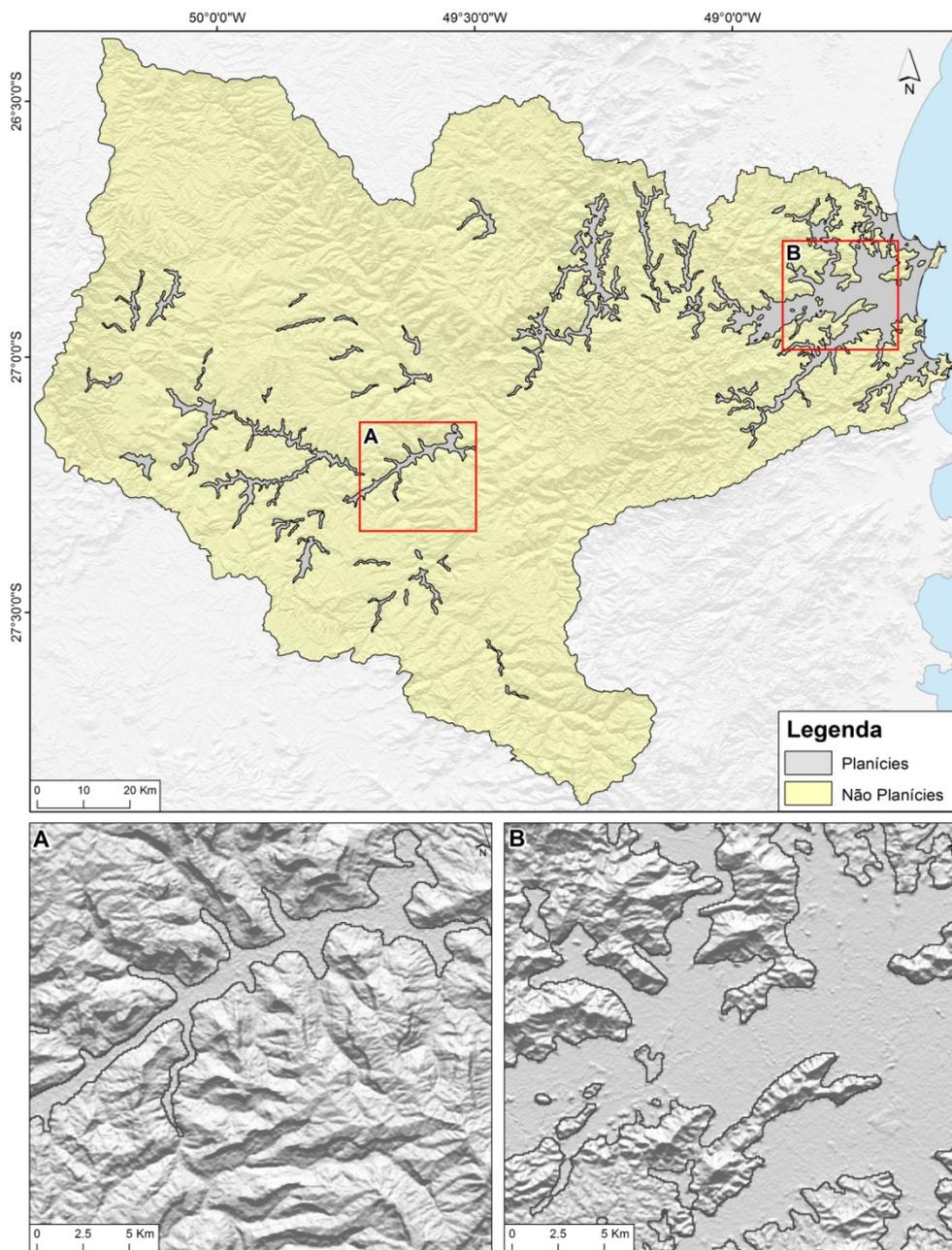
O mapeamento das feições referentes ao primeiro táxon gerou classes compatíveis à escala de domínios morfoestruturais, sendo mapeadas três principais feições: planícies, terrenos cristalinos e terrenos sedimentares fanerozóicos. Por se tratar da primeira subdivisão da área de estudo, esta etapa do trabalho exigiu um maior número de testes e operações para atingir o nível de síntese necessário.

5.1.1 Planícies

As planícies constituem áreas caracterizadas pela baixa ou nula expressão do relevo, motivo pelo qual representam os extremos inferiores da distribuição de derivações geomorfométricas básicas. Portanto, sua delimitação pôde ser feita independentemente das demais fases do mapeamento, as quais requereram um encadeamento hierárquico para definição de suas classes. O mapeamento das planícies foi feito previamente às demais etapas para que seus dados geomorfométricos, com sua distribuição singular, pudessem ser convenientemente retirados das análises aplicadas às demais classes de relevo (Figura 5.1). As planícies próximas ao litoral, constituídas por sedimentos marinhos e fluviais, são as mais extensas da área de estudo. Aquelas situadas no interior da bacia são constituídas por sedimentos alúvio-coluvionares. Essas planícies possuem menores extensões e largura do que as litorâneas, uma vez que se situam próximas a encostas que ainda não passaram por grandes processos de erosão. As planícies interioranas de

menores dimensões localizam-se nas sub-bacias do rio Itajaí do Norte e Itajaí do Sul, áreas cuja geologia condicionou a existência de terrenos mais encaixados e, portanto, planícies menos extensas (LUIZ, 2014).

Figura 5.1 - Resultado da classificação dos terrenos correspondentes às planícies. Os quadros A e B mostram uma visualização mais detalhada da delimitação.



Fonte: Produção do autor.

A representação do MDE em relevo sombreado (detalhes A e B da Figura 5.1) permite verificar o grau de ajuste satisfatório entre os limites obtidos com os procedimentos de delimitação das planícies e o padrão morfométrico característico destes terrenos. A observação do relevo sombreado mostra também a homogeneidade das planícies em determinadas características geomorfométricas, das quais seus valores tendem a nulos: altura, amplitude, curvatura em perfil, rugosidade e declividade.

Ressalta-se que a escolha da altura como variável utilizada para o mapeamento dessa classe deve-se ao desempenho nos testes, explicado pela combinação de suas características numéricas e variabilidade com as condições do relevo conforme representado no MDE, independentemente do grau de similaridade conceitual entre essa variável e características morfométricas do terreno. No caso da declividade, variável associada conceitual e intuitivamente à descrição de planícies (além da facilidade de obtenção em SIG), pequenas feições oferecem variações extremas que afetam a média calculada para as unidades assim como desfavorecem a contiguidade do delineamento. Este efeito ocorre também com dados de curvatura e rugosidade. Com o uso de MDE de resolução mais espaçada ou com o cálculo dessas derivadas em espaçamentos maiores (MOORE et al., 1993), há uma redução da sensibilidade a estas feições, concomitantemente a uma simplificação do delineamento planimétrico.

Pequenas feições também se mostram nos dados de altura, mas as variações internas às planícies não atingem os níveis circunvizinhos, como as demais derivadas testadas. Testes com um grupo de descritores geomorfométricos baseados na distribuição zonal da altimetria (índice elevação-relevo, predominância, profundidade de dissecação) levaram Muñoz (2014) a escolher a altura como variável crítica para o delineamento das planícies desta mesma bacia. A adoção da altura para delineamento de planícies deve observar todos os aspectos, técnicos ou naturais, que podem afetar seu desempenho: escala, natureza e resolução do MDE, método de cálculo das variáveis e o próprio relevo, da planície (feições internas) e do entorno.

Embora não sejam esperadas variações de cerca de 13m em condições de planície, este nível representa uma tolerância à presença de singularidades no MDE (topográficas ou não) nas áreas de planície. Nesta área de estudo, o aumento abrupto e espacialmente coeso da altura nas áreas circunvizinhas às planícies mantém reduzida a expansão dos limites delineados sobre as vertentes adjacentes, esperada como efeito indesejável desta tolerância. Portanto, apesar de o presente estudo confirmar a altura de até 13 m como base eficaz para o mapeamento das planícies na área de estudo é possível que outras condições (de MDE e de relevo, por exemplo) requeiram diferentes soluções para o melhor desempenho.

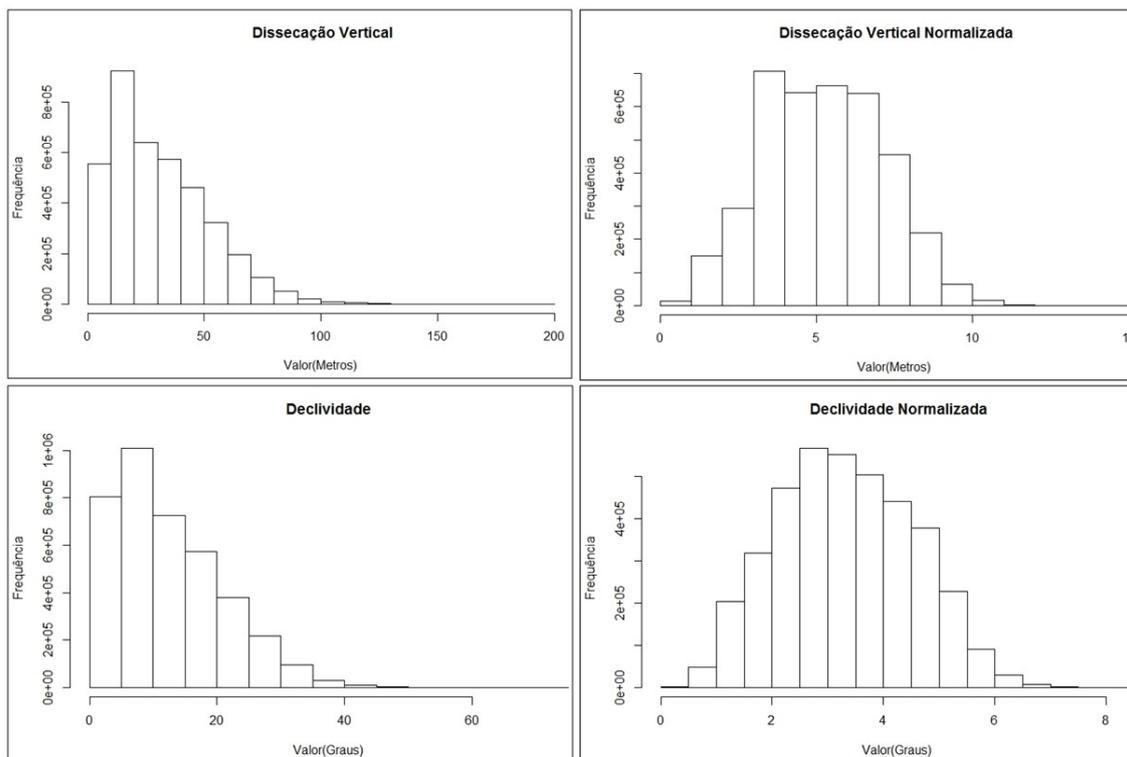
5.1.2 Terrenos cristalinos e sedimentares

As classes relativas aos terrenos cristalinos e terrenos sedimentares são as principais existentes no primeiro nível taxonômico. Pelo fato de estas classes terem sido mapeadas concomitantemente, os resultados serão também apresentados e discutidos de maneira simultânea.

5.1.2.1 Variáveis para segmentação

A Figura 5.2 mostra as distribuições da declividade e dissecação vertical originais e normalizadas. Percebe-se que, tanto a dissecação vertical, quanto a declividade tem distribuições em padrão assimétrico (*skewness*) na forma original. De acordo com os resultados da transformação Box-Cox, a função raiz quadrada foi a mais adequada para a normalização das distribuições para ambas as variáveis.

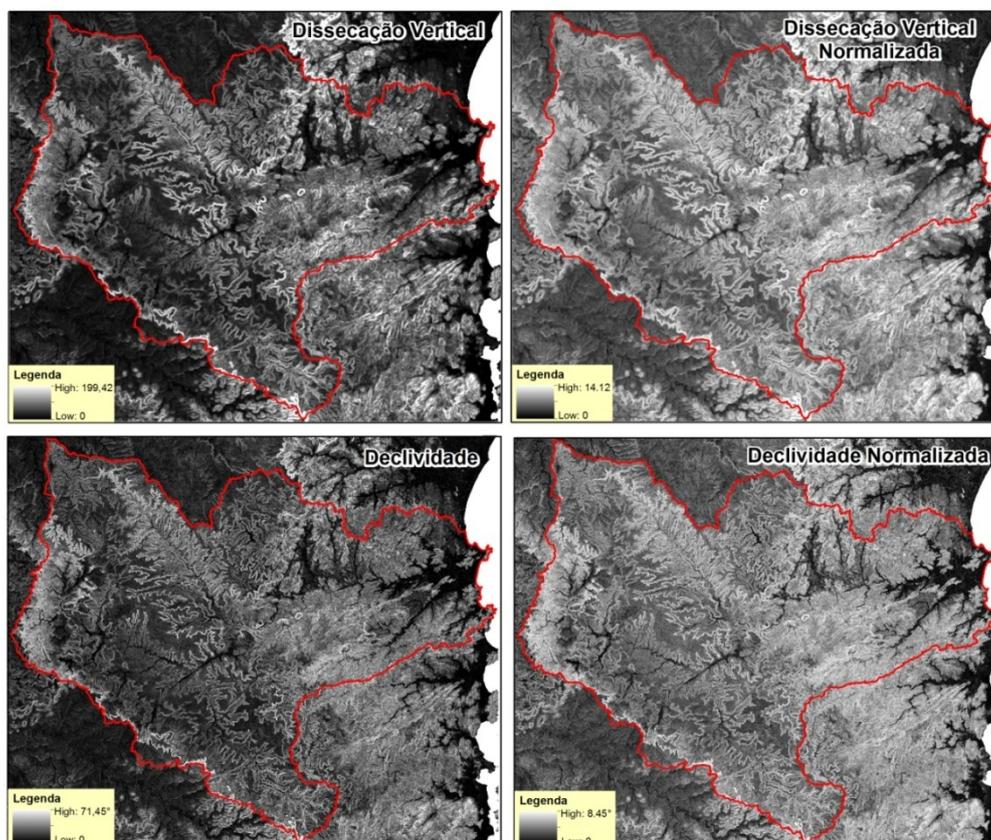
Figura 5.2 - Frequências da dissecação vertical e declividade, antes e após normalização.



Fonte: Produção do autor.

Na Figura 5.3 é possível observar a distribuição espacial dos números digitais das variáveis originais e transformadas. Nota-se que há uma diminuição do contraste com a normalização em razão da maior diminuição dos valores máximos, e com eles a diminuição da variância. Além disso, é possível perceber que ambas as variáveis ressaltam, sobretudo, a diferença de rugosidade ao longo dos terrenos da bacia.

Figura 5.3 - Distribuição espacial dos valores de declividade e dissecação vertical, antes e após serem normalizadas.



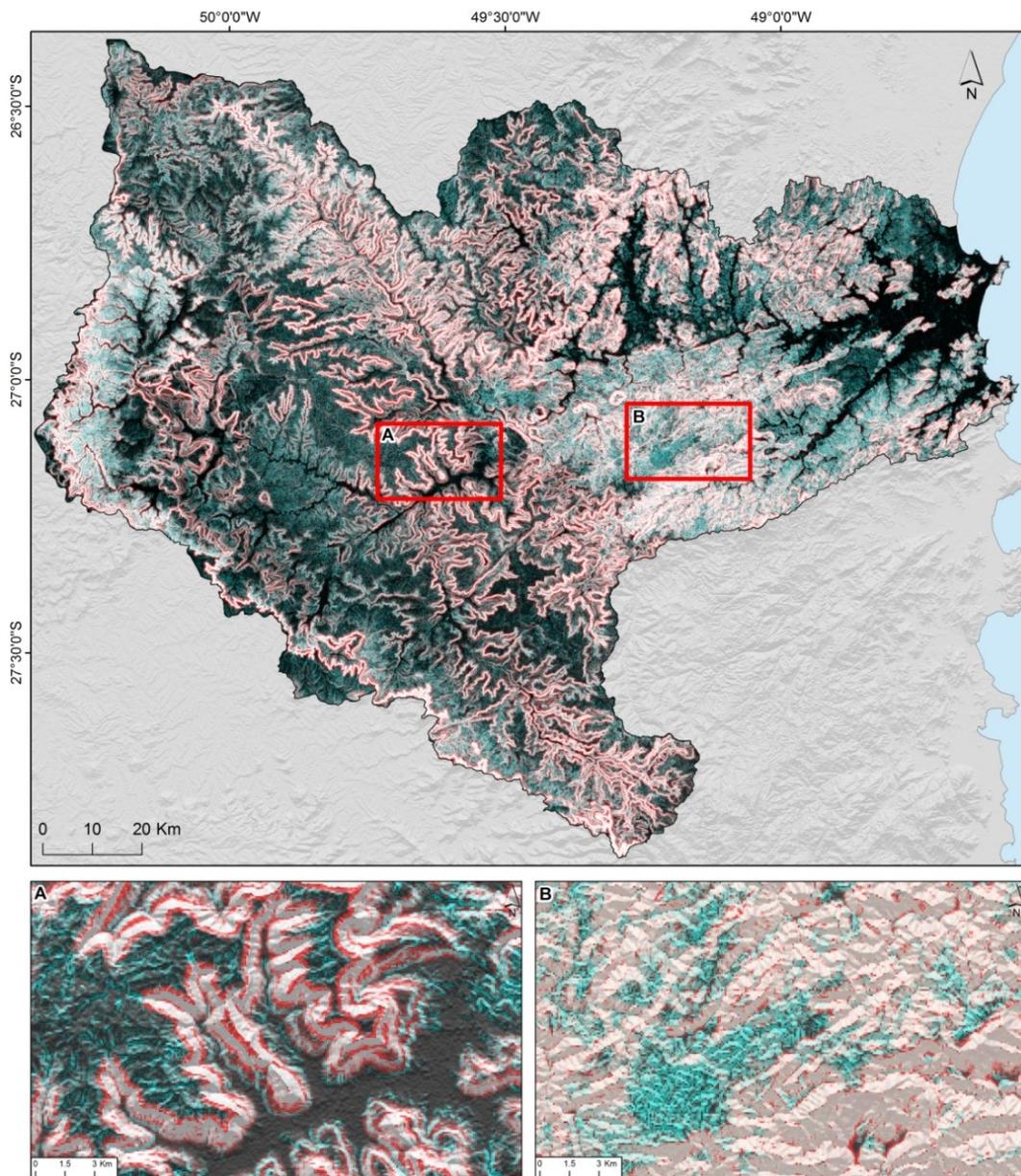
Fonte: Produção do autor.

Dada a semelhança visual entre a declividade e a dissecação vertical normalizadas, foi realizado o teste de correlação de Pearson. O resultado desta análise mostrou que estas variáveis possuem um coeficiente de correlação (r) de 0,79. Embora a utilização de variáveis muito semelhantes e correlacionadas entre si não pareça uma condição ideal, a porção não correlacionada de suas variâncias ($1-r^2$) pode explicar porque os resultados de segmentação (seção 5.1.2.2) obtidos com o uso combinado das variáveis foram superiores. De acordo com observações de Valeriano e Rossetti (2017), variações não correlacionadas estão associadas a características e feições de maior detalhe do que as evidenciadas em escalas gerais, possivelmente indicadoras de diferenças entre compartimentos subordinados às classes principais.

A Figura 5.4 mostra uma composição de bandas entre as variáveis de dissecação vertical e declividade normalizadas. Nesta composição RGB, o

dado de dissecação vertical foi inserido no canal do vermelho e o da declividade nos canais do verde e azul (cuja soma resulta em matiz ciano). Dessa forma, a variação correlacionada se apresenta em diferentes níveis de cinza, enquanto a ocorrência isolada de altos valores de dissecação vertical ou de declividade se apresenta, respectivamente, em vermelho ou ciano.

Figura 5.4 - Composição colorida entre a declividade e a dissecação vertical.



Fonte: Produção do autor.

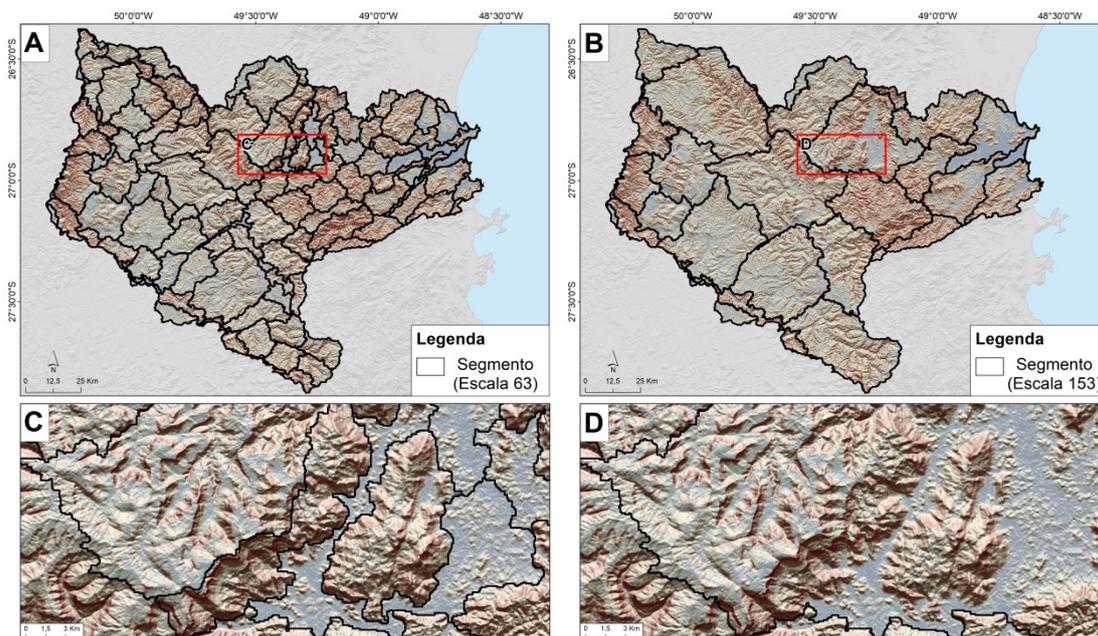
Na parte sudeste do quadro A da Figura 5.4 (quadro de detalhe a esquerda), a planície é homogeneamente escura, como resultado dos baixos valores de ambas as variáveis na composição colorida. As escarpas adjacentes apresentam diferentes estratos sedimentares, com faixas altas de dissecação vertical dispostas em diferentes níveis das vertentes, evidenciados pelas feições lineares paralelas, em vermelho. Na porção oeste desse quadro, as áreas de topo têm rugosidade baixa, em que singularidades de matiz ciano indicam pequenas feições declivosas de baixa dissecação vertical.

O quadro B da Figura 5.4 detalha padrão geral de cor clara e matiz (vermelho) fraco, numa indicação de altos níveis de declividade e dissecação vertical, podendo ser descrito como bastante rugoso. Em meio a este, há uma área (ciano) cuja distinção em relação ao entorno pode ser descrita pela relativa ausência de altos valores de dissecação vertical. Devido à alta densidade de pequenas feições de alta declividade, a textura de rugosidade mais fina é o atributo descritivo que distingue esta área em relação aos terrenos que circundam esta porção.

5.1.2.2 Segmentação

Tomando-se a declividade e a dissecação vertical como dados de entrada e com valores padronizados de forma e compacidade, os valores de tamanho calculados pelo *ESP2* como ideais foram de 353, 153 e 63. A segmentação com o nível 353 resultou apenas na separação entre a porção continental e a porção marítima da área analisada. A Figura 5.5 A e B apresenta o resultado final da segmentação utilizando tamanho de 153 e 63, respectivamente.

Figura 5.5 - Resultado da segmentação para tamanhos de segmento de 153 (A) e 63 (B), utilizando a declividade e dissecação vertical como planos de informação de entrada.



Fonte: Produção do autor.

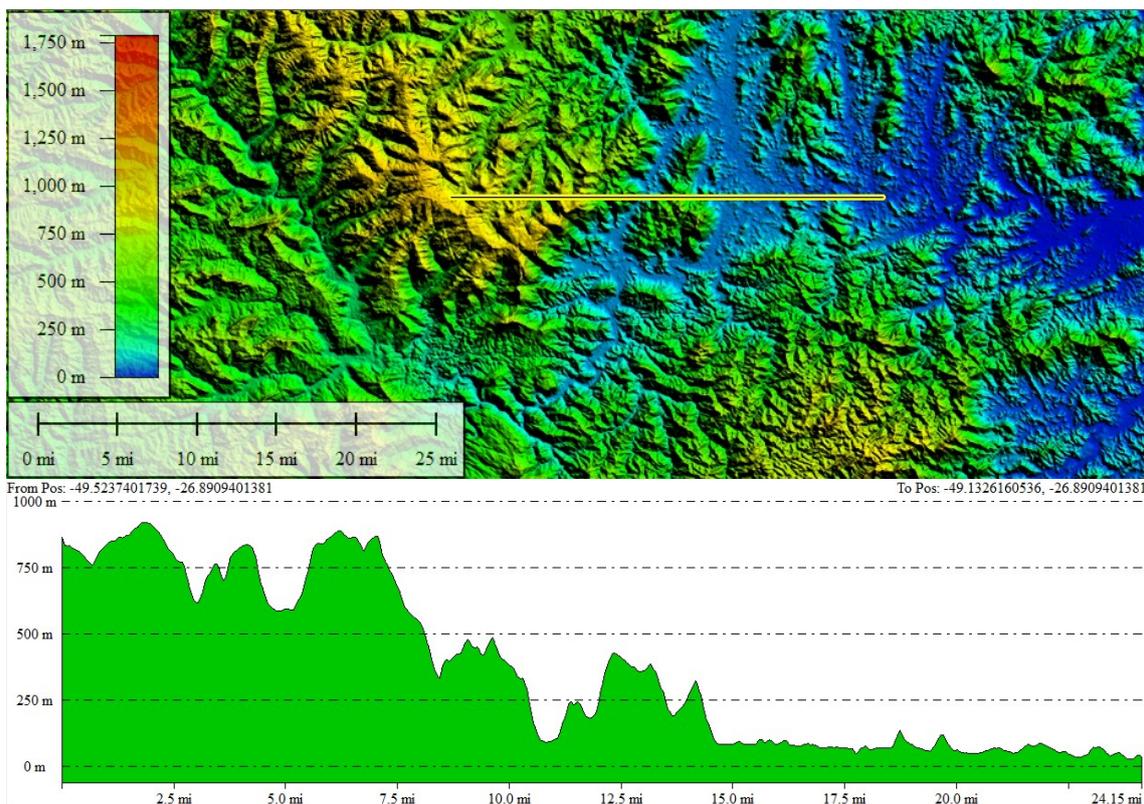
Os segmentos obtidos com o valor de 153 englobaram grande diversidade de feições geomorfológicas. No quadro de detalhe da Figura 5.5-C, é possível perceber, no centro da imagem, a zona de transição entre terrenos cristalinos e sedimentares, que ressalta padrões distintos que foram englobados em um mesmo segmento. Observa-se, desta forma, que um único segmento abarcou formas de colinas (pequenos fragmentos próximos à planície), um maciço isolado em meio à planície e feições de “frente de erosão”, tais como a escarpa que separa as terras baixas, a leste, do planalto a oeste. Ainda neste detalhe, percebe-se que o padrão da textura dos terrenos a oeste se difere dos terrenos a leste. Os terrenos a oeste apresentam-se acamadados e com vales fortemente encaixados nas encostas, enquanto a leste o relevo é mais dissecado e com vales menos escavados nas encostas.

Apesar da análise em nível de primeiro táxon requerer grau de generalização superior, considerou-se mais satisfatória a segmentação obtida com tamanho de 63 (Figura 5.5 – B). É possível perceber que os segmentos individualizaram

diferentes padrões de relevo (Figura 5.5-D), assegurando objetos com significados geomorfométricos, conforme preceito indicado por Dragut e Blaschke (2006). Percebe-se, ainda, que algumas unidades de mapeamento, tais como as expostas nos quadros ampliados, englobaram pequenas feições como colinas e escarpas, as quais foram mapeadas em escalas mais detalhadas em classes subordinadas ao primeiro táxon.

Com a utilização do fator de tamanho igual a 63 houve individualização mais detalhada dos padrões de relevo em diferentes segmentos. É possível notar a adequação dos segmentos aos limites entre padrões de relevo observados (quadro D - Figura 5.5). Na distribuição geral por toda a bacia, as terras situadas a oeste foram agrupadas em segmentos distintos das terras mais baixas situadas a leste. A diferenciação entre estes terrenos é um resultado desejável, à medida que informações prévias da área de estudo indicam que os terrenos mais altos a oeste correspondem à rochas sedimentares fanerozóicas e os terrenos mais baixos pertencem a rochas cristalinas (embasamento), uma vez que as camadas sedimentares que os recobriam no passado já foram erodidas (SANTA CATARINA, 1986). É possível visualizar no perfil topográfico da Figura 5.6 esta diferenciação dos valores de elevação.

Figura 5.6 - Perfil topográfico entre zona de transição entre terrenos cristalinos (à direita) e terrenos sedimentares (à esquerda).



Fonte: Produção do autor.

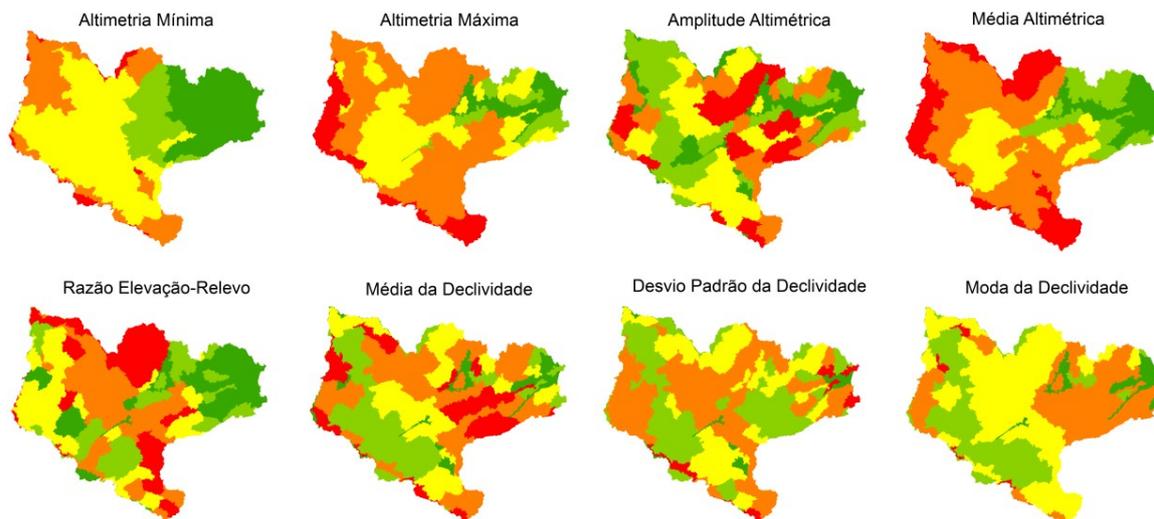
Como o objetivo da segmentação desta etapa do trabalho era a obtenção da diferenciação dos dois domínios morfoestruturais (terrenos sedimentares e cristalinos), conforme a diferença entre padrões observada visualmente, considerou-se a segmentação apresentada na Figura 5.5-B como satisfatória para representar as unidades de mapeamento deste primeiro táxon.

5.1.2.3 Classificação

A classificação dos segmentos buscou a separação entre os terrenos sedimentares fanerozóicos dos terrenos cristalinos que ocupam, respectivamente, as porções oeste e leste da área de estudo. As observações sobre o relevo em variados esquemas de visualização do MDE e plotagens de dados geomorfométricos regionais dos segmentos levaram à escolha de oito

variáveis para os testes de classificação. A Figura 5.7 apresenta o resultado das classificações obtidas por meio da análise de agrupamento.

Figura 5.7 - Resultado da análise de agrupamento para cada variável geomorfométrica utilizando o método hierárquico para constituição de 5 grupos.



Fonte: Produção do autor.

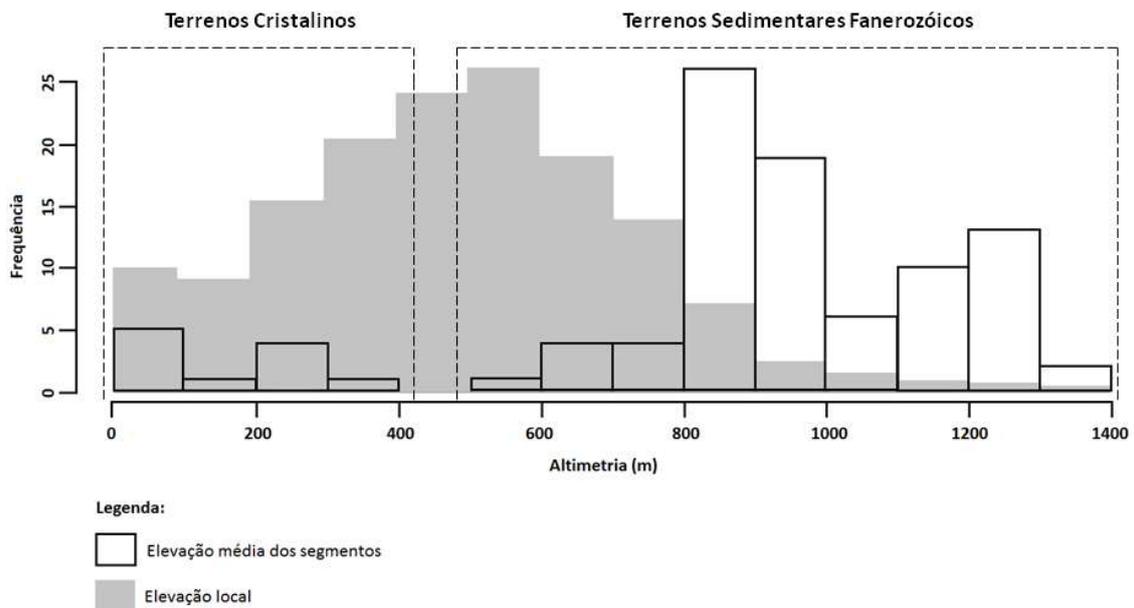
Os agrupamentos gerados pela altimetria máxima, amplitude altimétrica, média altimétrica, razão elevação-relevo, média da declividade e desvio padrão da declividade resultaram em descontinuidade espacial entre os grupos e não obtiveram relação significativa com a delimitação dos domínios morfoestruturais presentes nos mapas geológicos e geomorfológicos.

Por outro lado, os agrupamentos gerados com a altimetria mínima e moda da declividade evidenciaram padrões cuja disposição espacial se assemelha às fronteiras conhecidas entre terrenos cristalinos e sedimentares fanerozóicos. Dentre estes dois agrupamentos, verificou-se que o mapa produzido com a moda da declividade resultou em maior aderência aos mapeamentos existentes e com os padrões de textura relativos aos dois compartimentos, quando visualizados em detalhe.

No entanto, o resultado bruto do agrupamento da moda da declividade não distinguiu inteiramente os terrenos sedimentares e cristalinos. É possível notar a presença ocasional de pequenas áreas de uma das classes na porção em

que predomina a outra classe (cores laranja e amarelo), de maneira cruzada. Em razão disso, foi realizado uma pós-classificação com base na estratificação altimétrica geral dos domínios morfoestruturais da bacia. Neste procedimento, unidades formadas pela agregação de segmentos de mesma classe de agrupamento tiveram suas altitudes médias calculadas. A Figura 5.8 mostra o histograma da altimetria média destas unidades em sobreposição ao histograma dos valores locais de elevação.

Figura 5.8 - Distribuição da média altimétrica de unidades formadas por contiguidade espacial entre segmentos de mesma classe de agrupamento (barras vazadas) sobreposto ao histograma da distribuição da elevação local (pixel a pixel), em barras preenchidas em cinza.



Fonte: Produção do autor.

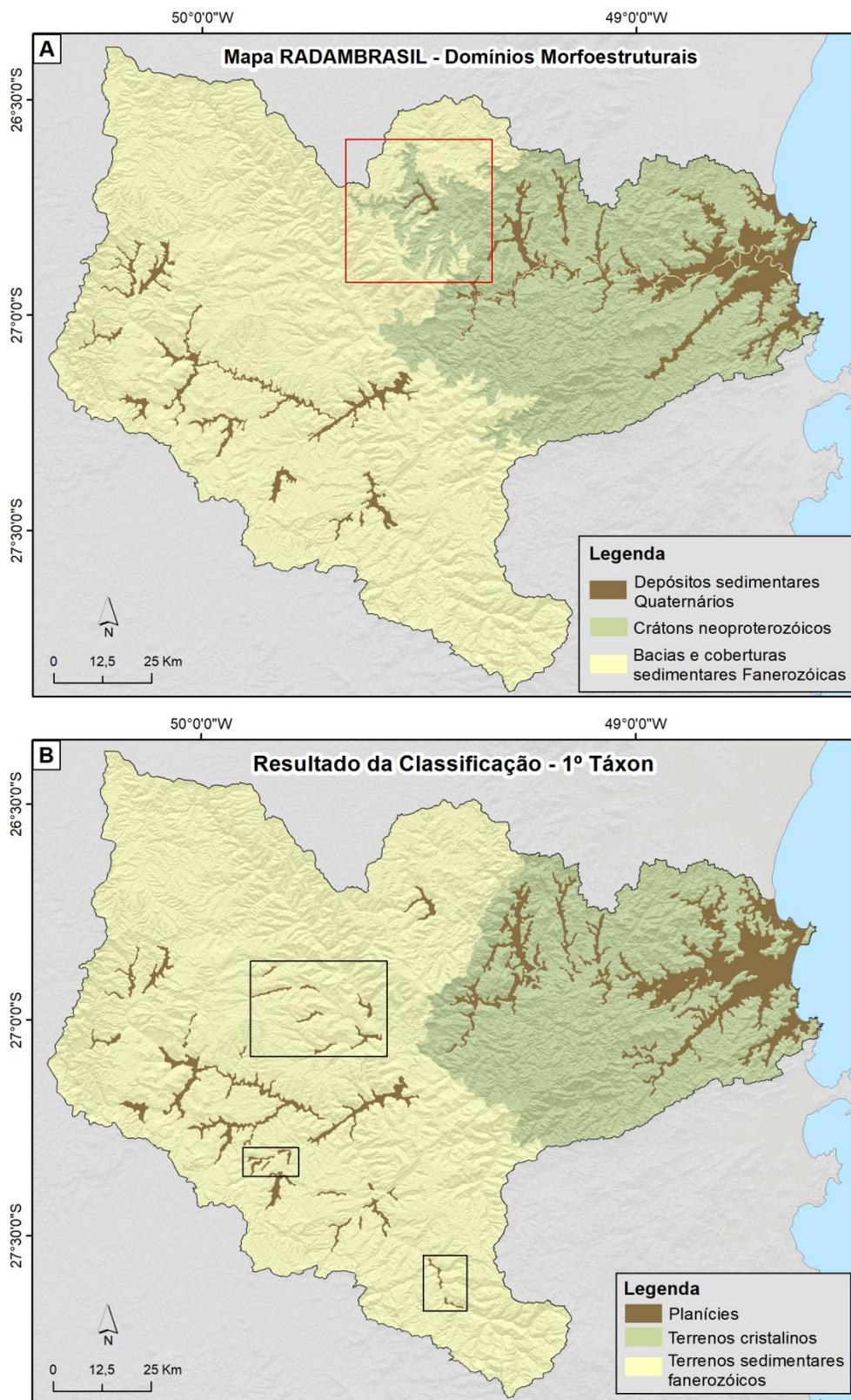
A partir da Figura 5.8, é possível notar que os valores locais de elevação apresentam grande variação dentro das unidades de mapeamento, portanto incluem a elevação de singularidades (altas ou baixas). Isto ocasiona uma dispersão dos valores em torno da elevação geral dos domínios morfoestruturais. A regionalização por médias em unidades zonais, por sua vez, causa o agrupamento dos valores em torno da elevação geral dos dois estratos. Em relação à distribuição da altimetria média, é possível notar dois

padrões distintos: o primeiro variando de 0 a 400m e o segundo variando de 500a 1.400m. O reconhecimento desses dois padrões permitiu que grupos com altimetria média inferior a 400m fossem classificados como terrenos cristalinos e os grupos com média superior a 400m fossem classificados como terrenos de cobertura sedimentar fanerozóica. Observando ambas as distribuições é possível notar que a elevação em sua forma local não possibilitaria tal distinção, enquanto que os valores médios das elevações por segmentos puderam evidenciar a distinção entre os dois domínios.

5.1.2.4 Avaliação da classificação

O mapa obtido pelos processamentos metodológicos apresentou grandes semelhanças visuais, tanto com o mapa geomorfológico do RADAMBRASIL quanto com o mapa da CPRM (2004). Tal similaridade permitiu a elaboração de procedimentos de validação convencionais (quantitativos) para os resultados obtidos neste táxon. A Figura 5.9-A apresenta o mapa geomorfológico do RADAMBRASIL e a Figura 5.9-B a classificação final.

Figura 5.9 - Comparação entre as classes geomorfológicas existentes no mapa do RADAMBRASIL ('A') e as obtidas pela metodologia deste trabalho ('B').

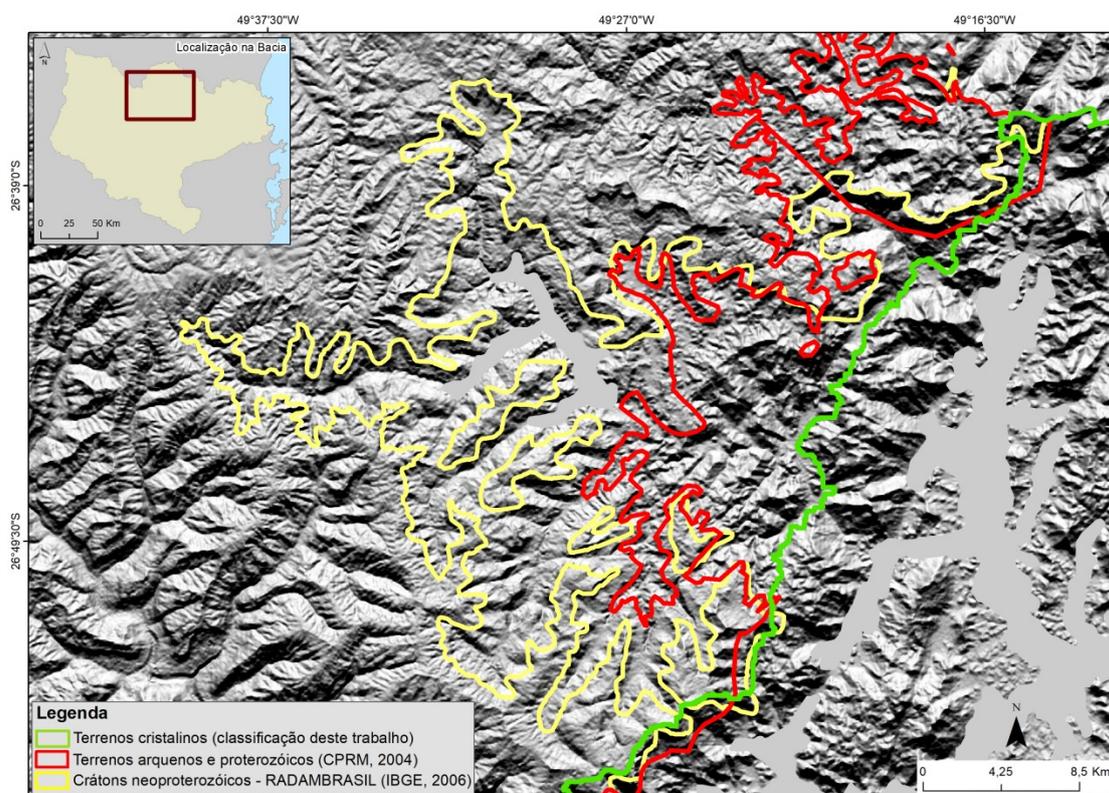


Fonte: Figura A: Mapa compilado pelo autor a partir de dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2006) e Produção do autor (Figura B).

Conforme destacado pelos quadros da Figura 5.9-B, percebe-se que a metodologia proposta resultou em uma maior quantidade de feições mapeadas como planícies do que as existentes no RADAMBRASIL. Esta diferença pode ser explicada em parte pela natureza de classificação aplicada neste trabalho, gerada por processos automáticos e quantitativos, em parte pela escala potencial dos dados usados (de MDE), cujo limite de detalhamento se estende além daquele oferecido pelos dados usados para o RADAMBRASIL. Enquanto a missão SRTM foi projetada para fornecer MDE passível de trabalho em escalas entre 1:100.000 e 1:250.000, o que, além das possibilidades de geoprocessamento, oferece mais detalhamento do que a base de dados usada para interpretação do RADAMBRASIL que, em última instância, consiste em material analógico preparado na escala 1:250.000.

Nota-se que a porção noroeste do mapa dos crátons neoproterozóicos do RADAMBRASIL, destacada pelo quadro vermelho da Figura 5.9-A, é a que possui a maior disparidade com resultados obtidos neste trabalho. A Figura 5.10 mostra esta área com mais detalhe, sobrepondo ao sombreamento do relevo os limites do domínio cristalino existentes nos mapas geológico e geomorfológico oficiais e o limite gerado pela classificação proposta.

Figura 5.10 - Comparação entre as delimitações geradas pelo mapeamento do RADAMBRASIL, o mapeamento geológico da CPRM e pela classificação proposta.



Fonte: Produção do autor.

Na Figura 5.10 é possível notar que os traçados de todos os mapas possuem diferenças. Isto já era esperado em razão das diferenças de método e de base de dados utilizados para elaboração desses diferentes mapeamentos, conforme discutido anteriormente. A delimitação gerada pelo RADAMBRASIL é a que apresenta maiores disparidades em relação aos outros dois traçados. Abstraindo as diferenças devido às escalas distintas, percebe-se que o limite gerado pela classificação proposta neste trabalho se assemelha mais com a delimitação do mapa geológico (CPRM, 2004).

Os resultados obtidos com a avaliação quantitativa entre o mapeamento geomorfológico do RADAMBRASIL e a classificação proposta estão apresentados na tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Avaliação quantitativa entre o mapa oficial e o obtido neste trabalho.

Avaliação	Planícies	Terrenos Cristalinos	Terrenos Sedimentares
Verdadeiro positivo (km ²)	802,429	3.883,19	9.539,49
Falso negativo (km ²)	137,97	692,51	303,79
Falso positivo (km ²)	317,77	266,87	586,30
Porcentagem de detecção (%)	85,3	84,6	96,9
Erro de omissão (%)	14,7	15,4	3,1
Erro de comissão (%)	28,4	6,5	5,8

Fonte: Produção do autor.

O resultado da tabulação cruzada indica que a classe referente às planícies foi a que apresentou os maiores erros de comissão (inclusão), correspondendo a 28,4% da área mapeada. A classe referente aos terrenos cristalinos foi a que possuiu a maior porcentagem de erros de omissão, 15,4%. Este valor possivelmente se relaciona com a diferença entre os traçados do mapa do RADAMBRASIL e os limites obtidos com a classificação, dado que a distribuição geral desta classe nas duas fontes foi semelhante. No entanto, como já era esperado em razão da semelhança visual, é possível notar que a porcentagem de detecção das três classes foi muito boa (acima de 80% para todas as classes), numa indicação da semelhança entre os resultados da classificação e o mapeamento geomorfológico existente.

Por fim, vale ressaltar que apesar de estas medidas serem convencionalmente intituladas de “erros”, no caso deste trabalho elas não necessariamente representam locais cujas características geomorfométricas não sejam condizentes com a tipologia de compartimento geomorfológico em questão. Em razão da diferença de abordagem e de bases cartográficas, tais medidas

devem ser consideradas disparidades, muitas vezes oriundas do próprio método de mapeamento, que incluiu desde os dados até as análises. No exemplo mais evidente, a confirmação visual do padrão típico de planícies nas áreas classificadas como tal, que estão ausentes no mapeamento RADAMBRASIL, indica que o erro calculado pela tabulação cruzada fornece uma medida dos ganhos obtidos com metodologia experimentada em relação à referência.

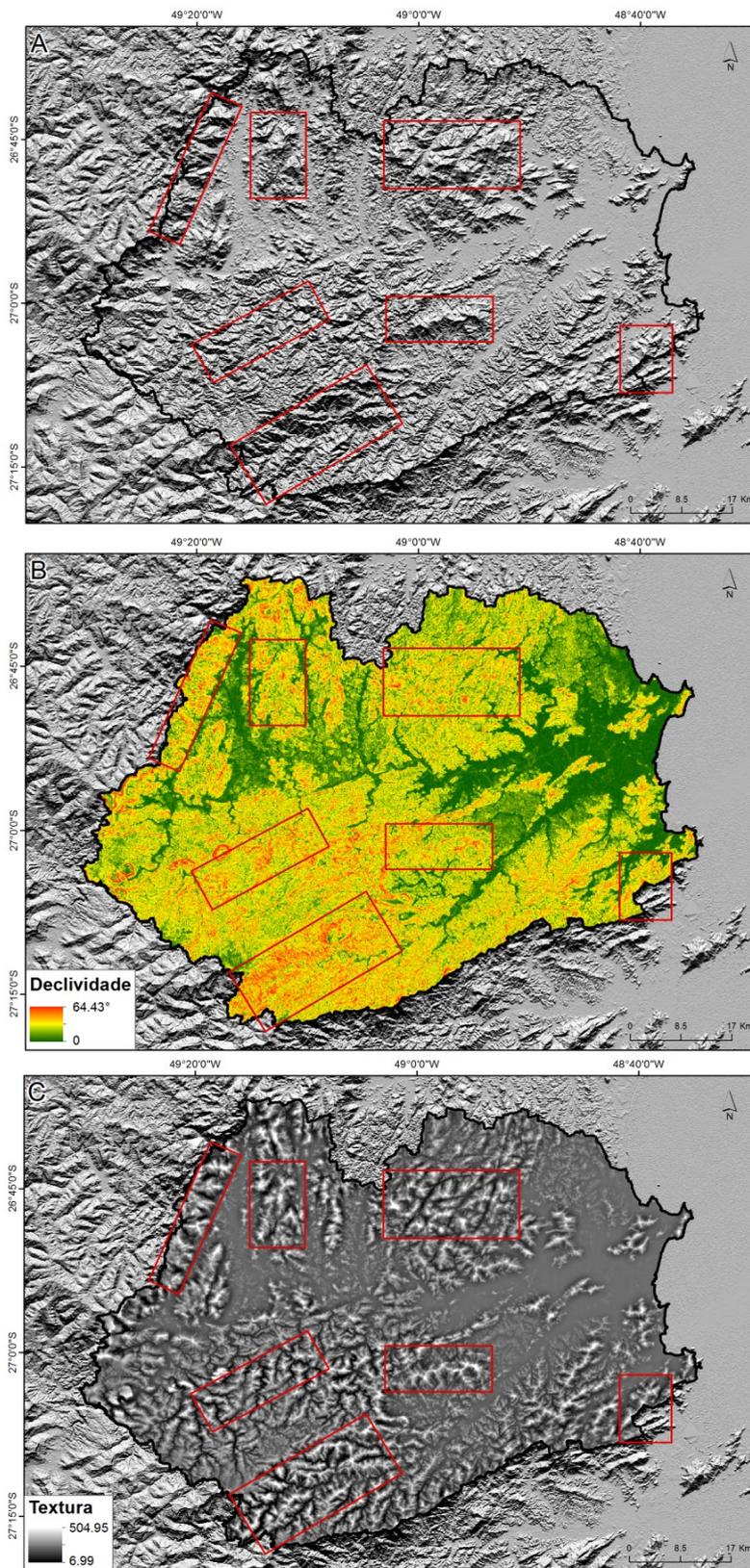
5.2 Segundo táxon

Os resultados das classificações relativas a um segundo nível hierárquico envolvem a subdivisão dos terrenos cristalinos e dos terrenos sedimentares. Para os terrenos cristalinos, considerou-se a existência de duas principais subclasses: terrenos montanhosos e ondulados a forte ondulados. Para os terrenos sedimentares considerou-se a existência das seguintes subclasses: terrenos dissecados e suave ondulados.

5.2.1 Terrenos cristalinos montanhosos e ondulados a forte ondulados

Esta etapa do trabalho se pautou na observação de diferentes variáveis geomorfométricas de modo a averiguar a existência de possíveis padrões pertinentes de distinção. Na Figura 5.11 é possível observar a distribuição espacial de algumas variáveis geomorfométricas dentro do domínio cristalino. Os retângulos vermelhos dentro dos quadros A, B e C ressaltam as áreas mais declivosas. Estas áreas foram os pontos de partida para a constatação da existência de dois principais subgrupos presentes nos terrenos cristalinos. Principalmente no quadro C, o qual retrata a textura de relevo, é possível notar com clareza a existência de dois padrões de rugosidade diferentes.

Figura 5.11 – Sombreamento de relevo (mapa A), declividade (mapa B) e textura de relevo (mapa C).



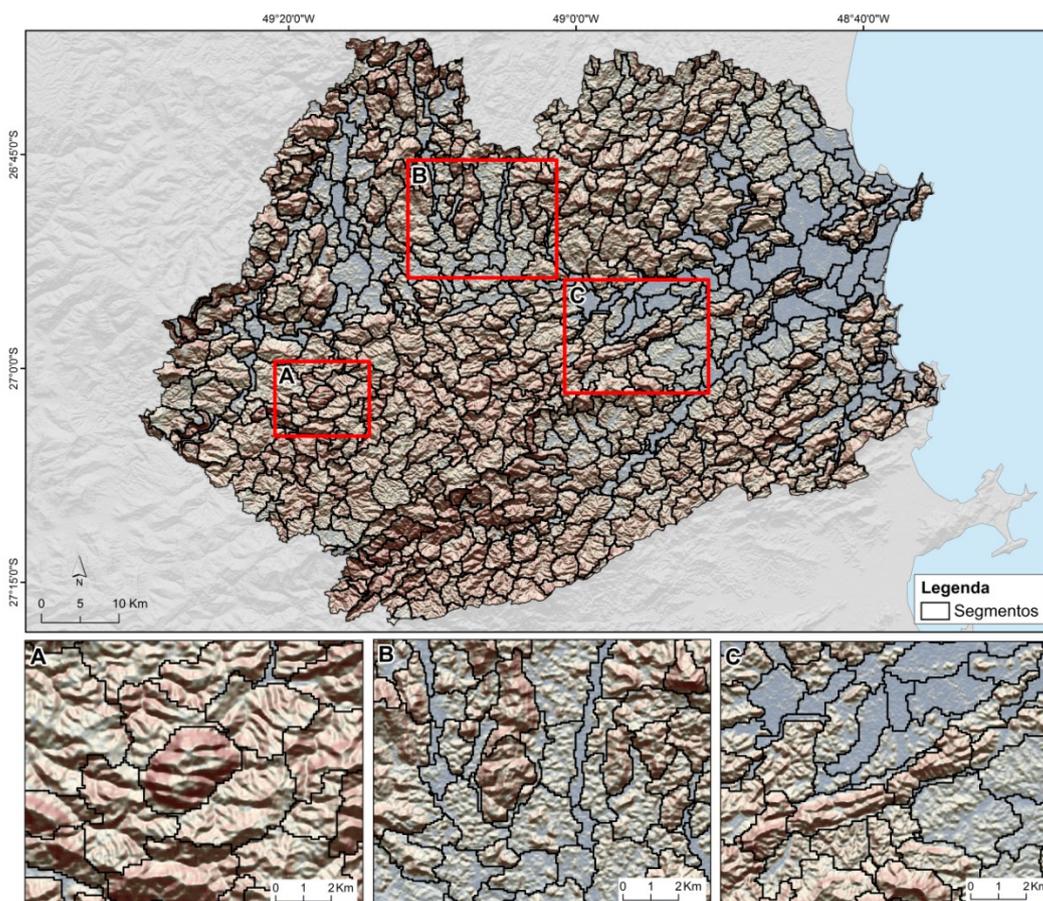
Fonte: Produção do autor.

Dentre as variáveis observadas (declividade, altimetria, textura, forma de terreno e curvatura vertical), a textura foi considerada a que mais satisfatoriamente ressaltou visualmente a diferença morfométrica existente entre os dois padrões mapeados dentro dos terrenos cristalinos.

5.2.1.1 Segmentação

O mapeamento dos subgrupos presentes nos terrenos cristalinos foi gerado a partir de uma abordagem baseada na obtenção de unidades de mapeamento. As variáveis utilizadas para a segmentação deste táxon também foram a declividade e a dissecação vertical normalizadas. Esses descritores, que expressam a rugosidade do terreno, foram escolhidos a partir de experimentos envolvendo o uso de diferentes variáveis. No entanto, diferentemente da etapa anterior em que foi utilizado um fator tamanho de 63, nesta etapa utilizou-se um fator igual a 13. Este limiar, considerado o mais satisfatório, foi escolhido a partir da observação de resultados gerados por diferentes parâmetros. A Figura 5.12 apresenta o resultado da segmentação realizada para esta etapa do trabalho.

Figura 5.12 - Resultado da segmentação do segundo táxon (terrenos cristalinos).



Fonte: Produção do autor.

Conforme pode ser observado, os segmentos criados nesta etapa do trabalho possuem tamanhos menores que os utilizados para o mapeamento dos domínios morfoestruturais. Este nível de segmentação permitiu isolar feições com características singulares em relação às vizinhas e até mesmo terrenos similares, mas que expressam pequenas diferenças em relação às feições vizinhas.

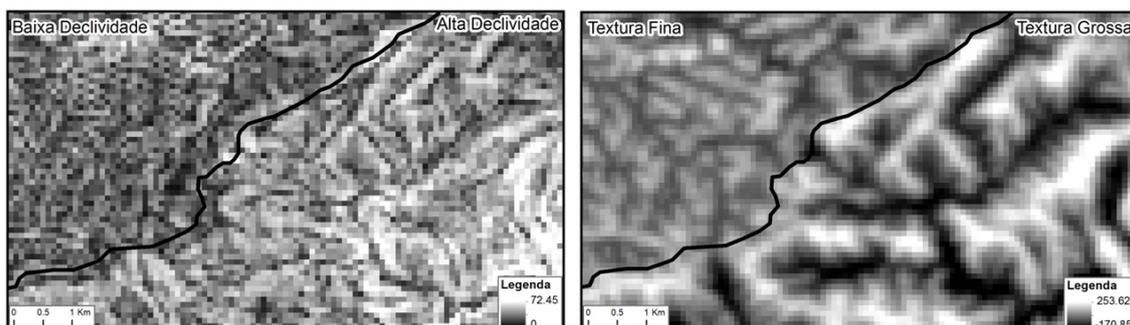
No quadro A da Figura 5.12 é possível notar a individualização de feições situadas em um maciço cristalino. É interessante notar que algumas porções com características distintas foram englobadas em segmentos individuais tais como a feição central do quadro, que possui um formato arredondado. No quadro B da Figura 5.12 é possível notar a individualização de feições mais suaves, tais como colinas, as quais foram englobadas em segmentos distintos aos de feições com maiores elevações e declividade. No quadro C, é possível

verificar um exemplo de individualização de um lineamento existente em área próxima à planície.

5.2.1.2 Subdivisão dos terrenos cristalinos

Os resultados obtidos com os testes de regionalização das diferentes variáveis geomorfométricas para a classificação das unidades de mapeamento do segundo nível hierárquico apontaram a textura de relevo como a mais satisfatória para a segmentação dos dois subgrupos existentes nos terrenos cristalinos. Ao comparar planos de informação de declividade e textura de relevo (Figura 5.13), foi possível notar que os terrenos com textura mais grosseira possuíam também maior declividade. Por outro lado, os terrenos com textura mais fina possuíam menores valores de declividade.

Figura 5.13 – Relação visual entre as variáveis de declividade e textura de relevo.



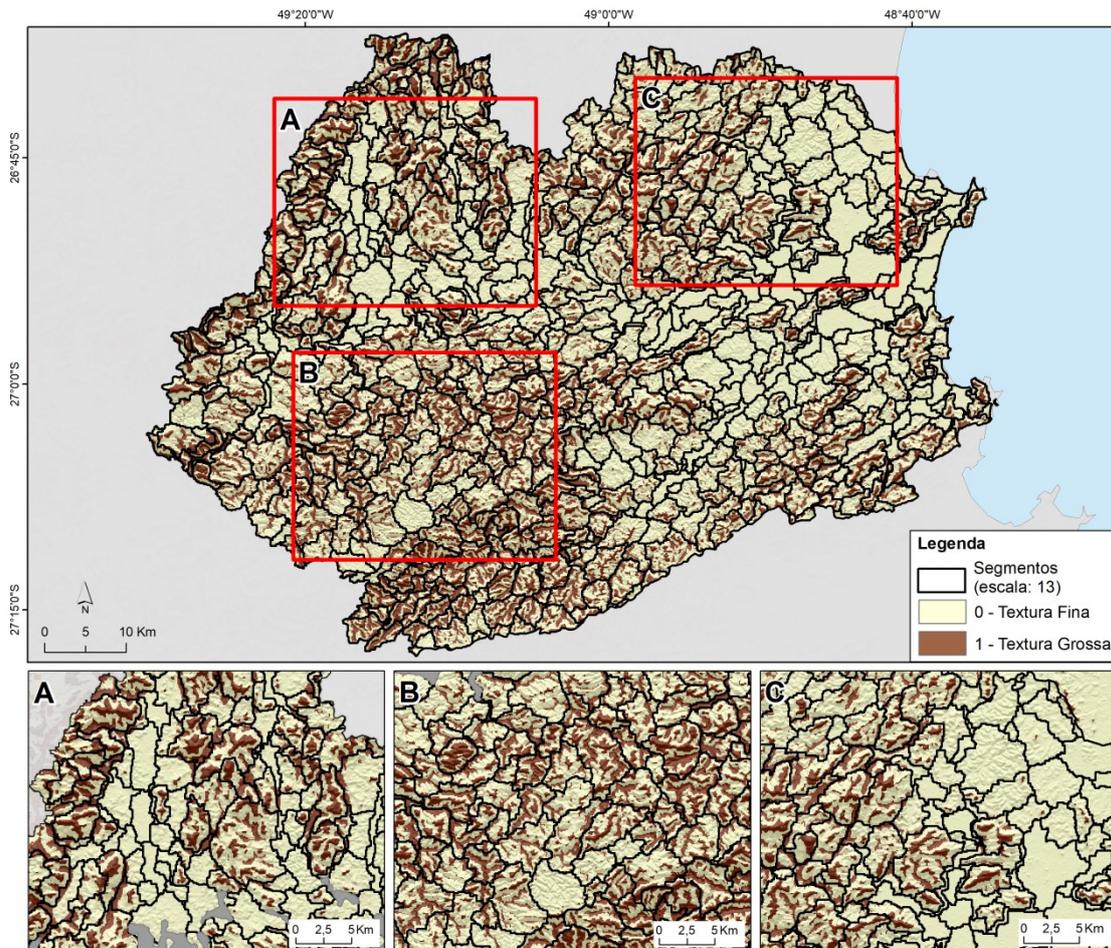
Fonte: Produção do autor.

A textura é uma variável que expressa a rugosidade dos terrenos. Valores baixos de textura representam áreas de fundo de vale, e os valores altos representam topos de morro. Neste sentido, quanto maior a presença de valores extremos (altos e baixos) em um determinado raio de busca, mais fina tende a ser a textura do terreno. Por outro lado, quanto maior a distância entre interflúvios, mais grosseira é a textura (IWAHASHI; PIKE, 2007).

A Figura 5.14 apresenta a frequência de topos de morro e fundos de vale dentro dos segmentos. Esta frequência se mostra importante para a distinção de

subgrupos pertencentes aos terrenos cristalinos, à medida que os segmentos se agrupam em extensões contínuas conforme este critério. É possível perceber que em alguns segmentos há uma frequência relativamente alta, enquanto em outros estas feições são visualmente ausentes.

Figura 5.14 - Frequência de valores representando textura fina e textura grossa em terrenos correspondentes ao embasamento cristalino.

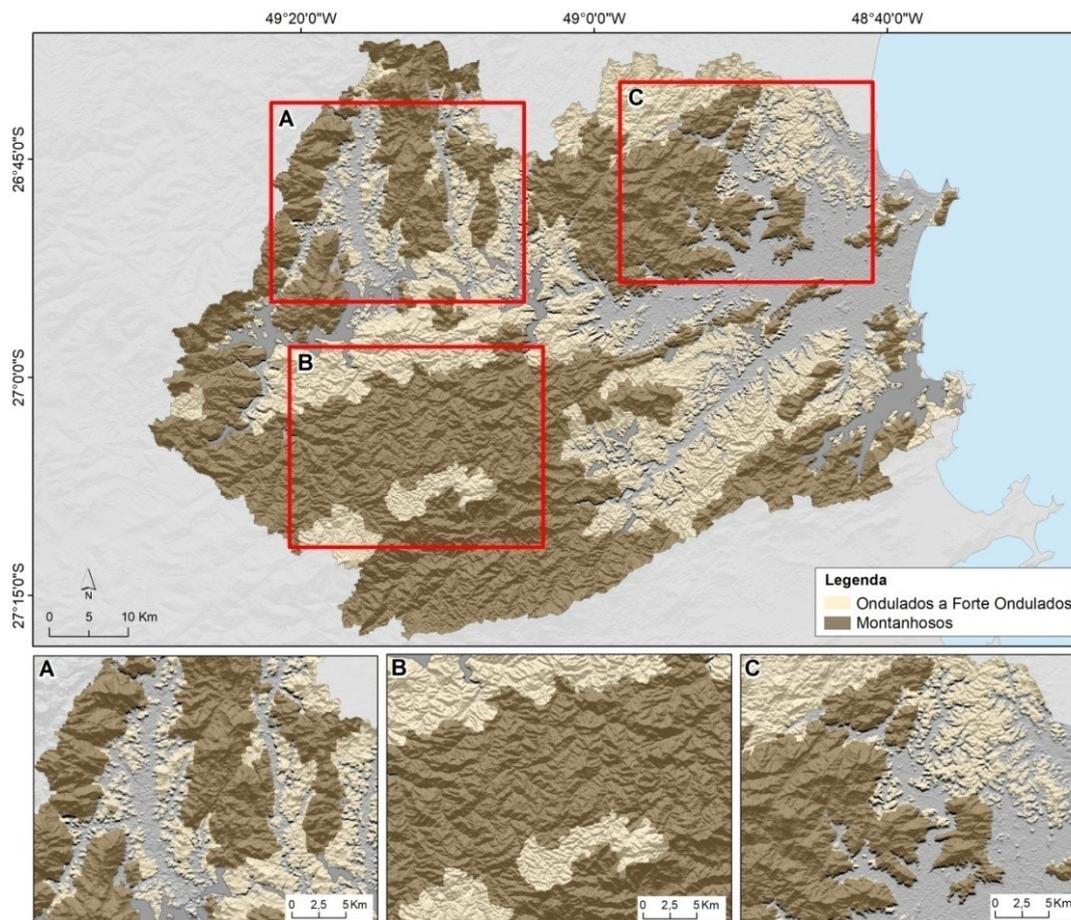


Fonte: Produção do autor.

Os quadros de detalhe A, B e C da Figura 5.14 mostram a classificação entre terrenos de textura fina e textura grossa. É possível perceber que locais como planícies e áreas com relevo um pouco mais suavizado praticamente não possuem a classe 1 dentro de seus segmentos.

A Figura 5.15 apresenta o resultado final da classificação dos subgrupos nos terrenos cristalinos de acordo com a frequência de elementos classificados como textura fina (classe 0 da Figura 5.14) e textura grossa (classe 1 da Figura 5.14). Os terrenos classificados como montanhosos na Figura 5.15 têm alta declividade e frequência elevada de topos de morro e fundos de vale, os quais correspondem às feições em cor rosa representadas na Figura 5.4. Estes se localizam, sobretudo, em maciços de morros e montanhas. É possível notar que as porções de terrenos menos escarpados, classificados neste trabalho como ondulados a forte ondulados, localizam-se majoritariamente próximos às planícies, com exceção aos destacados no quadro B da Figura 5.15.

Figura 5.15 - Classificação final da subdivisão dos terrenos cristalinos referentes ao 2º táxon.



Fonte: Produção do autor.

Os quadros de detalhe da Figura 5.15 apresentam os mesmos quadros retratados na Figura 5.14. É possível perceber que os locais com predominância de textura fina foram classificados como terrenos ondulados a forte ondulados. Esses locais correspondem a morros mais suaves e algumas colinas. Os locais com textura grossa foram classificados como terrenos montanhosos, uma vez que apresentam maior declividade. É interessante notar que o quadro B da Figura 5.15 retrata a mesma feição evidenciada no quadro B Figura 5.4, a qual na composição colorida entre declividade e dissecação vertical foi evidenciada pela cor ciano.

A Figura 5.16 apresenta uma perspectiva 3D da região retratada nos quadros B das Figuras 5.4 e 5.15. Esta porção dos terrenos cristalinos chama atenção pelo fato de parecer uma “ilha” com distinta assinatura geomorfométrica, uma

vez que os terrenos ao seu redor são mais declivosos. Esta região coincide com uma área mapeada pela CPRM (2004) como pertencente à unidade geológica Granito Faxinal. Essa unidade corresponde a uma suíte intrusiva que ocorre como *stock* e é marcada por de corpos graníticos ricos em hornblenda (Basei, 2000). Os terrenos vizinhos, mapeados no presente trabalho como ‘escarpados’, correspondem à geologia do Complexo Metamórfico Brusque. Esse complexo é composto por rochas metamórficas de baixo grau, com presença de micaxisto, metarenitos, quartzitos e sequências vulcanometamórficas que possuem cerca de 2 bilhões de anos (SILVA, 1987).

Figura 5.16 - Contraste entre os padrões de alta declividade vistos no quadro B da Figura 5.15.

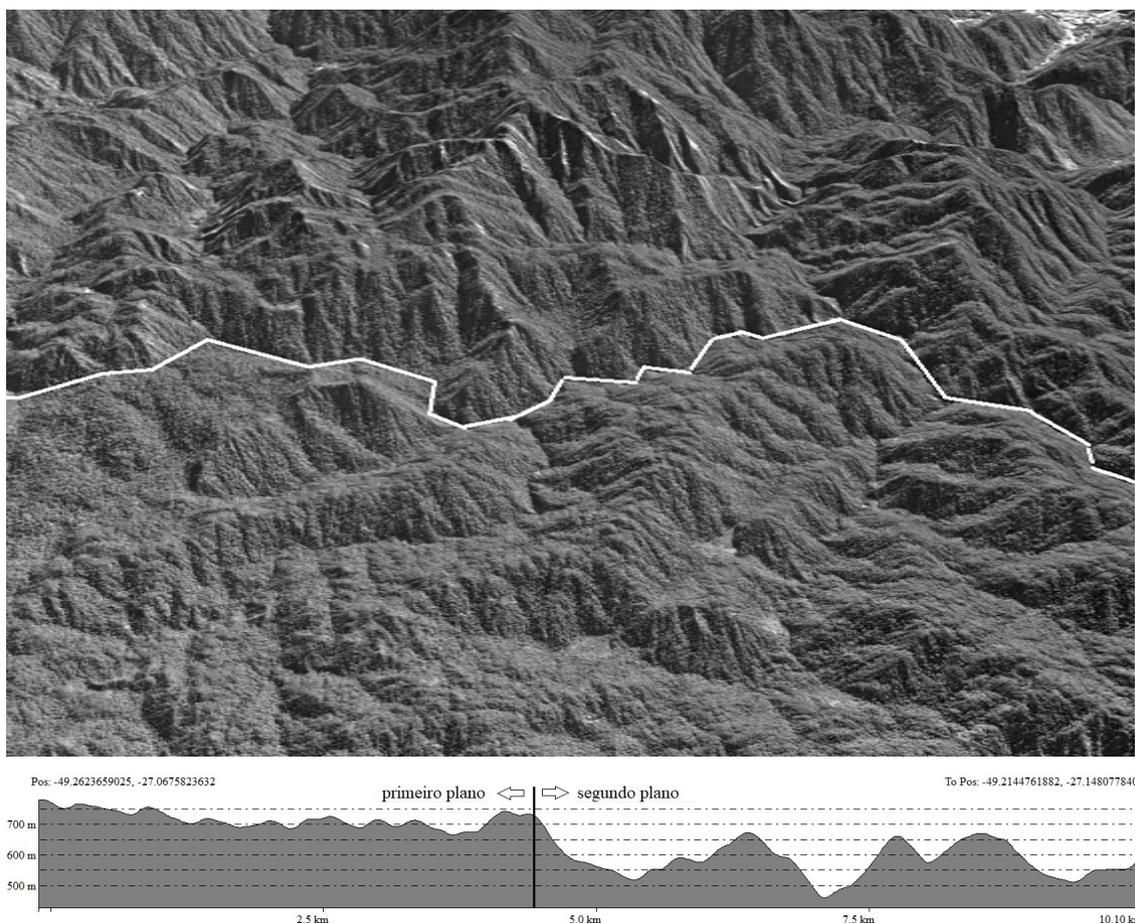


Imagem sobre perspectiva pelo Google Earth, visada de 6,8km de altitude em direção ao Norte com exagero vertical de 3x; posição central em 27° 05' S; 49° 07' W. Área urbanizada do sudoeste de Blumenau no canto superior direito da imagem.

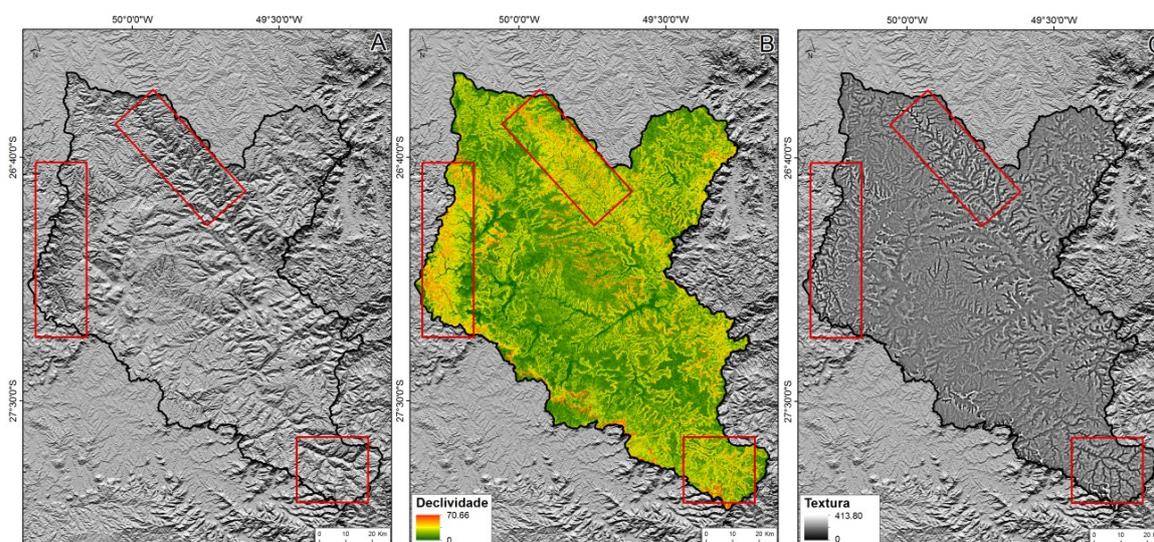
Fonte: Google Earth (2018) (imagem superior) e produção do autor (gráfico inferior).

Na Figura 5.16, em primeiro plano, é possível observar um padrão de textura mais fina e menor dissecação vertical (cor ciano, na Figura 5.4). Em segundo plano, há um terreno fortemente dissecado de textura grossa (representado em rosa claro na Figura 5.4). O perfil topográfico da Figura 5.16 representa um transecto altimétrico entre o primeiro plano (terrenos classificados como ondulados a forte ondulados) e o segundo plano (terrenos classificados como montanhosos). É possível notar que nesta porção observada, os terrenos ondulados a forte ondulados possuem uma média altimétrica superior aos terrenos montanhosos. Inclusive as cotas máximas dos terrenos retratados em primeiro plano são aproximadamente 100 m superiores aos terrenos do segundo plano. Por outro lado, a declividade média dos terrenos ondulados a forte ondulados se mostra inferior à dos terrenos montanhosos, cujos valores médios são respectivamente, 6,3° e 11,9°.

5.2.2 Terrenos sedimentares dissecados e suave ondulados

Para a averiguação da existência de possíveis subgrupos nos terrenos sedimentares, foram observadas as distribuições espaciais das mesmas variáveis que os terrenos cristalinos.

Figura 5.17 - Distribuição espacial do sombreamento (mapa A), declividade (mapa B) e textura (mapa C).



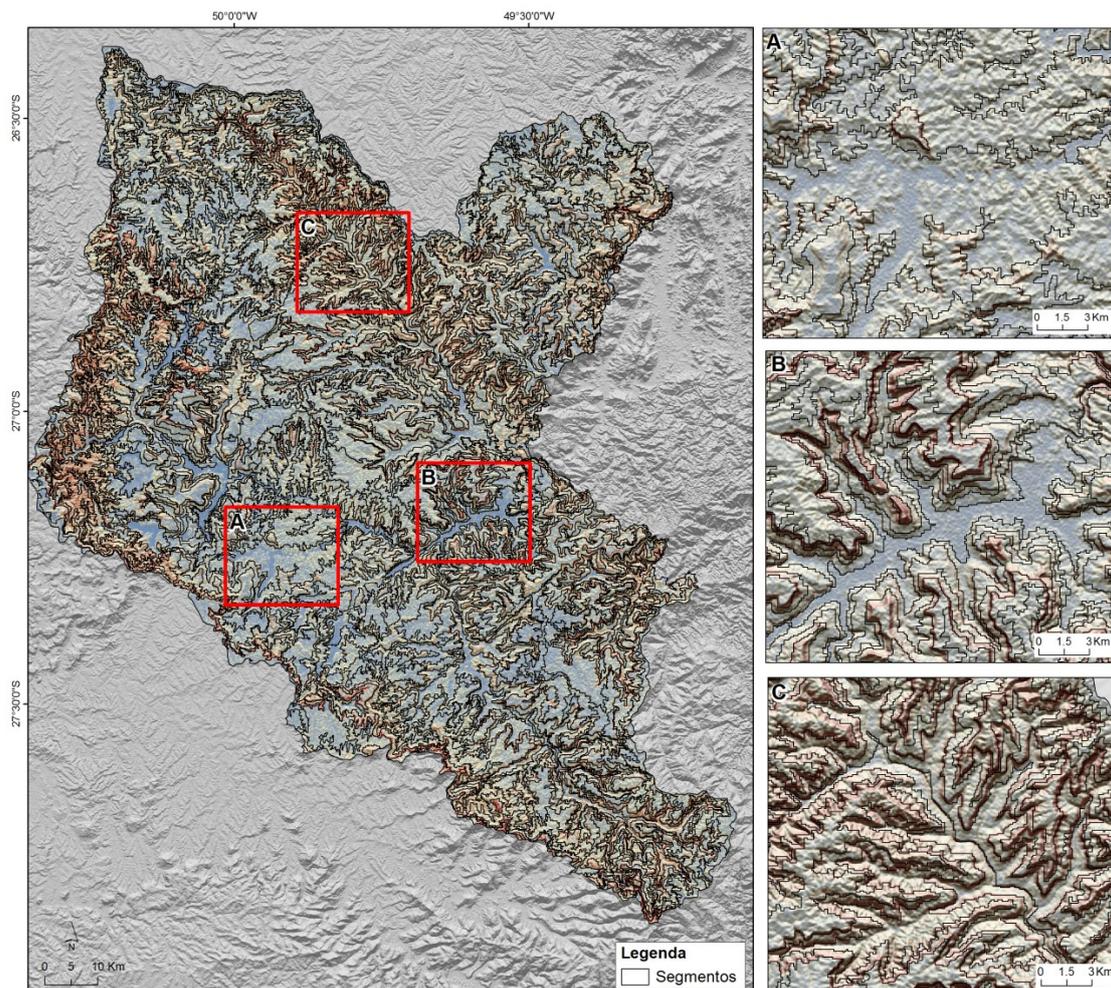
Fonte: Produção do autor.

Diferentemente dos terrenos cristalinos, a textura de relevo não demonstrou tanta eficácia para o reconhecimento de distintos padrões de relevo nos terrenos sedimentares. Por outro lado, ao observar o mapa de declividade (quadro B – Figura 5.17), é possível perceber a existência de regiões com padrões semelhantes, tais como as porções indicadas nos quadros vermelhos. Constatou-se desta forma, a existência de pelo menos dois padrões de declividade diferentes. Um padrão mais declivoso e dissecado, correspondendo aos terrenos situados nas extremidades do domínio sedimentar, classificados neste trabalho como terrenos dissecados e outro menos declivoso, situado ao centro deste domínio, o qual foi classificado como terreno suave ondulado.

5.2.2.1 Segmentação

A Figura 5.18 apresenta o resultado da segmentação baseada na altimetria para o estabelecimento de unidades de mapeamento relativas aos subgrupos de terrenos sedimentares. É possível perceber que esses segmentos possuem um padrão de formas e de distribuição notavelmente distinto daqueles criados por meio da declividade e dissecção vertical (seção 5.1.2.2 e 5.2.1.1). Devido ao uso da altimetria como dado de entrada, os segmentos gerados nesta etapa do trabalho apresentaram um padrão mais linear, com segmentos finos e alongados. Em algumas porções acompanham inclusive as curvas de nível.

Figura 5.18 - Resultado da segmentação do segundo táxon (terrenos sedimentares) utilizando a altimetria como dado de entrada.



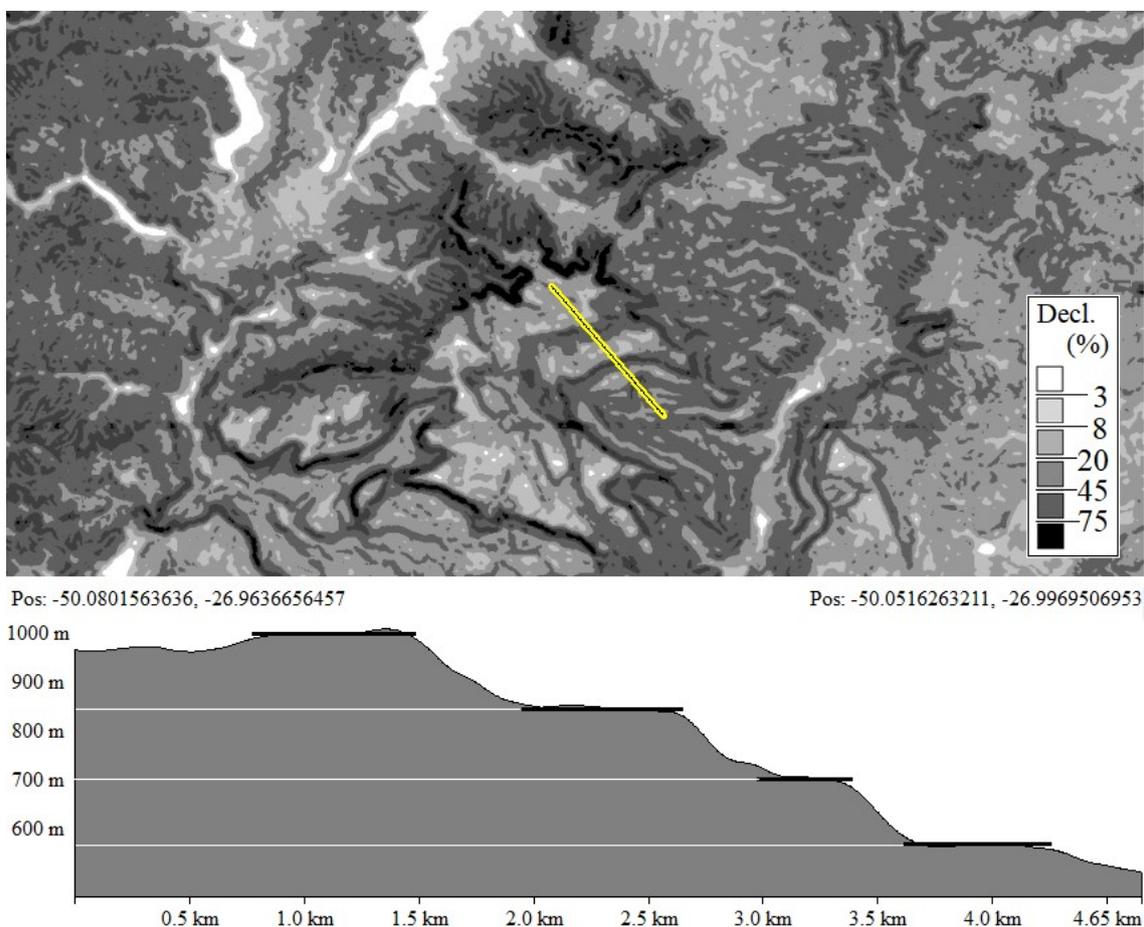
Fonte: Produção do autor.

No quadro A da Figura 5.18 é destacada uma região mais suave dos terrenos sedimentares, essa região possui maior homogeneidade altimétrica e por consequência propiciou a ocorrência de segmentos maiores. No quadro B da Figura 5.18 é possível notar que os segmentos individualizaram feições de planícies, o que já era esperado uma vez que estas feições geomorfológicas também possuem elevação homogênea. O quadro C da Figura 5.18 ilustra a presença de segmentos lineares, similar ao comportamento de curvas de nível, os quais acompanham as camadas sedimentares.

Os terrenos desta porção da bacia, por possuírem geologia sedimentar, apresentam-se em camadas, o que faz da elevação uma variável

conceitualmente associada à distribuição dos pacotes sedimentares, confirmado experimentalmente por Valeriano e Rossetti (2017) no mapeamento geomorfométrico da Amazônia Central. Como particularidade do presente estudo, na região de fronteira do terreno sedimentar com os terrenos cristalinos a leste, a dissecação devido à erosão expõe as camadas sedimentares escalonadas em sucessão de patamares e escarpas alternadas ao longo das vertentes (Figura 5.19). Portanto, os segmentos ao longo de níveis altimétricos são determinados pela sequência estratigráfica do perfil do terreno.

Figura 5.19 - Disposição das camadas sedimentares em vertentes de classes de declividade alternadas e seu perfil altimétrico escalonado.



Transecto localizado entre as localidades Rio do Campo e Saleté.
Fonte: Produção do autor.

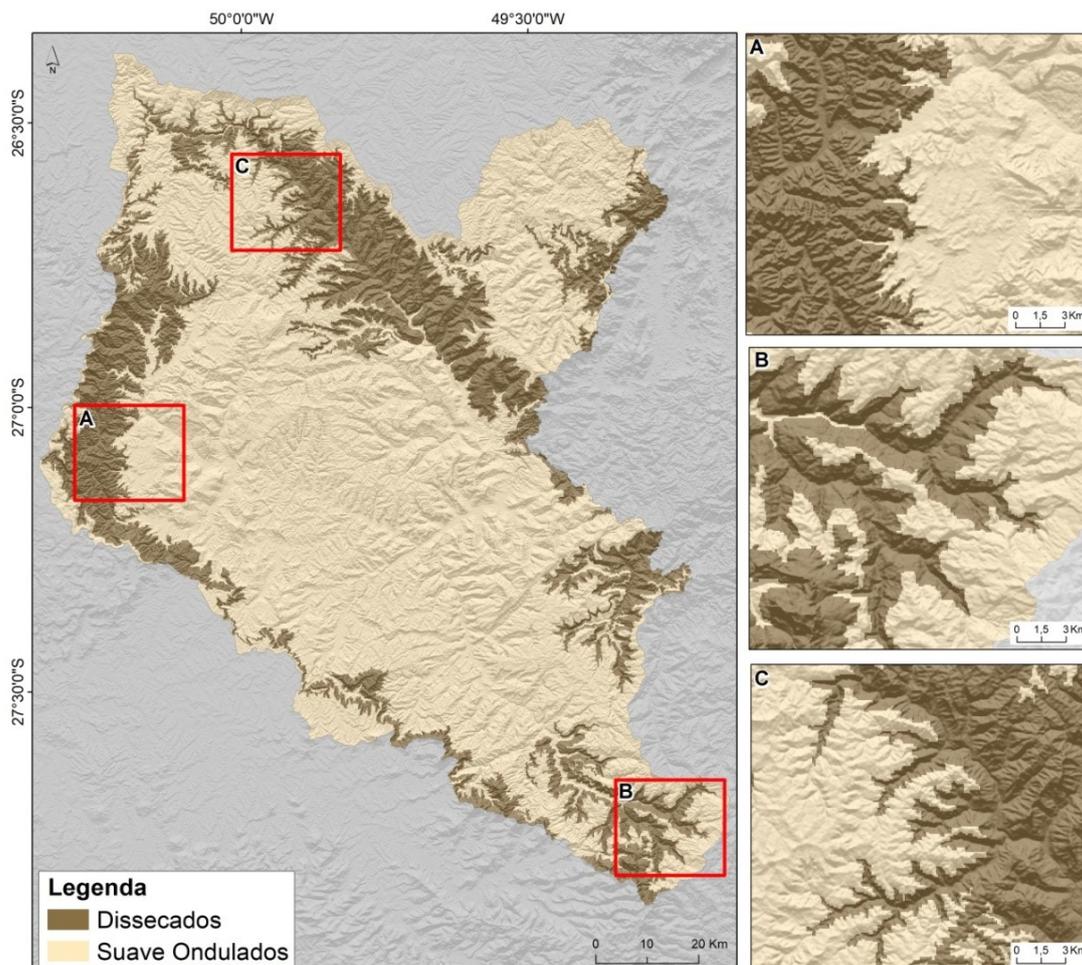
A Figura 5.19 retrata o padrão tabular de uma porção do relevo situado nos terrenos sedimentares. No perfil topográfico é possível notar a existência de

4camadas diferentes, configuradas em forma de patamares. Essas camadas correspondem, respectivamente, à formação Palermo (camada com menor altitude, situada na extremidade sul do transecto), Irati (2ª camada), Serra Alta (3ª camada) e Teresina (4ª camada, situada na extremidade norte do transecto e com maior altimetria). Essas formações se caracterizam por depósitos marinhos que vão desde rochas intensamente bioturbadas como siltitos arenosos até folhelhos e argilitos (SILVA, 1979).

5.2.2.2 Subdivisão dos terrenos sedimentares

A subdivisão dos terrenos sedimentares buscou separar o relevo mais preservado situado em sua região central das áreas fortemente dissecadas próximas às suas extremidades. Esta etapa foi realizada a partir da classificação da declividade média regionalizada das unidades de mapeamento. Os terrenos 'dissecados', segundo a legenda, são aqueles cuja média da declividade das unidades de mapeamento foi superior a 13,7°. Terrenos com média inferior a este limiar foram incluídos na classe 'suave ondulados'.

Figura 5.20 - Classificação final da subdivisão dos terrenos sedimentares referentes ao 2º táxon.



Fonte: Produção do autor.

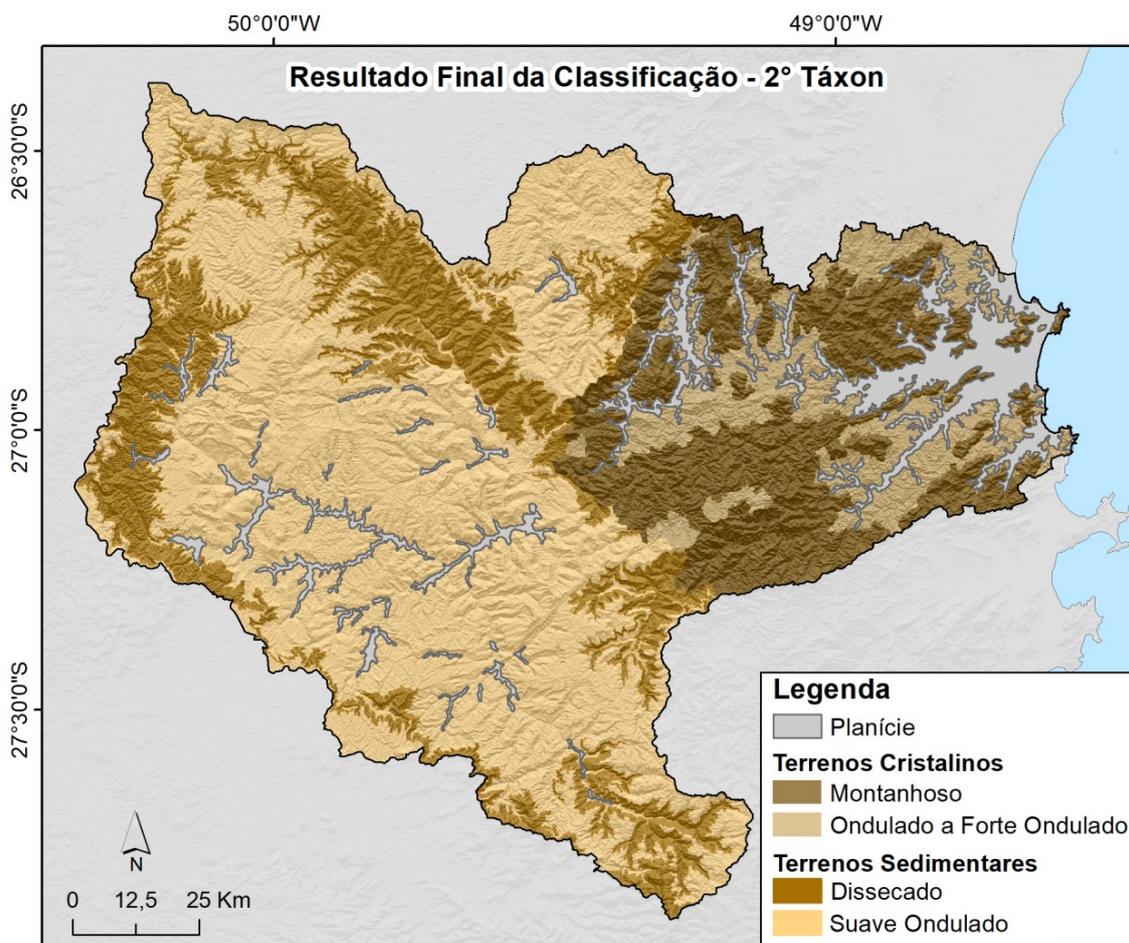
No quadro A da Figura 5.20, é possível perceber o destaque aos terrenos que fazem parte da Serra Geral, classificados como terrenos dissecados. À direita no quadro A, percebe-se a ocorrência de terrenos classificados como suave ondulados, que apresentam um padrão menos rugoso e mais homogêneo. No quadro B da Figura 5.20, é possível notar que as porções classificadas como dissecadas correspondem a escarpas compostas por rochas sedimentares. O quadro C da Figura 5.20 destaca uma porção dos terrenos pertencentes a sub-bacia do rio Itajaí do Norte, a qual é marcada pela presença de um expressivo lineamento. Uma distinção que se faz em relação à área declivosa da extremidade oeste do terreno sedimentar (destacada no quadro 5.20-A) é seu desnível positivo (mais alto) em relação à porção central, numa indicação de

vertentes formadas a partir da dissecação da Serra Geral. Em contraposição, as demais áreas declivosas (5.20-B e 5.20-C) sugerem dissecação do terreno sedimentar mapeado. No primeiro caso, apesar de sua inclusão entre os terrenos sedimentares da bacia do Itajaí-Açu, deve-se considerar a origem distinta de suas demais subclasses, suave ondulado e dissecados.

5.2.3 Classificação final do segundo táxon

A Figura 5.21 apresenta o resultado da união das duas classificações realizadas por processos distintos. As variações internas aos terrenos cristalinos e sedimentares mostraram-se suficientemente regionalizadas para permitir que fossem mapeadas sub-classes para cada geologia isoladamente nos táxons mais detalhados (2º e 3º táxon). Os resultados de ambas as classificações são harmônicos e sua justaposição não apresenta descontinuidades (Figura 5.21).

Figura 5.21 - Classificação final do táxon 2.



Fonte: Produção do autor.

5.3 Terceiro Táxon

O mapeamento das feições referentes ao terceiro táxon também foi realizado conforme a subdivisão criada nos domínios morfoestruturais. Nos terrenos cristalinos foi possível mapear feições de colinas e algumas escarpas isoladas. Nos terrenos sedimentares, a partir da metodologia empregada, foi possível mapear mais detalhadamente apenas feições de escarpas.

5.3.1 Colinas

Exames detalhados sobre os dados auxiliares mostraram um padrão de relevo colinoso, caracterizado por ondulações que se destacam dentro das áreas de

planícies. Essas colinas ocorrem na periferia de planícies, em proximidade às áreas de relevo mais pronunciado, diferindo destas pela altura e declividade menores. Nestas colinas, observa-se também um padrão de uso/cobertura distinto tanto das planícies (culturas anuais mecanizadas) quanto das áreas montanhosas (floresta), o que contribuiu para o reconhecimento das colinas como classe de relevo subordinada às áreas de planície (Figura 5.22).

Figura 5.22 - Disposição do terreno colinoso entre a planície (1º plano) e relevo montanhoso à direita.



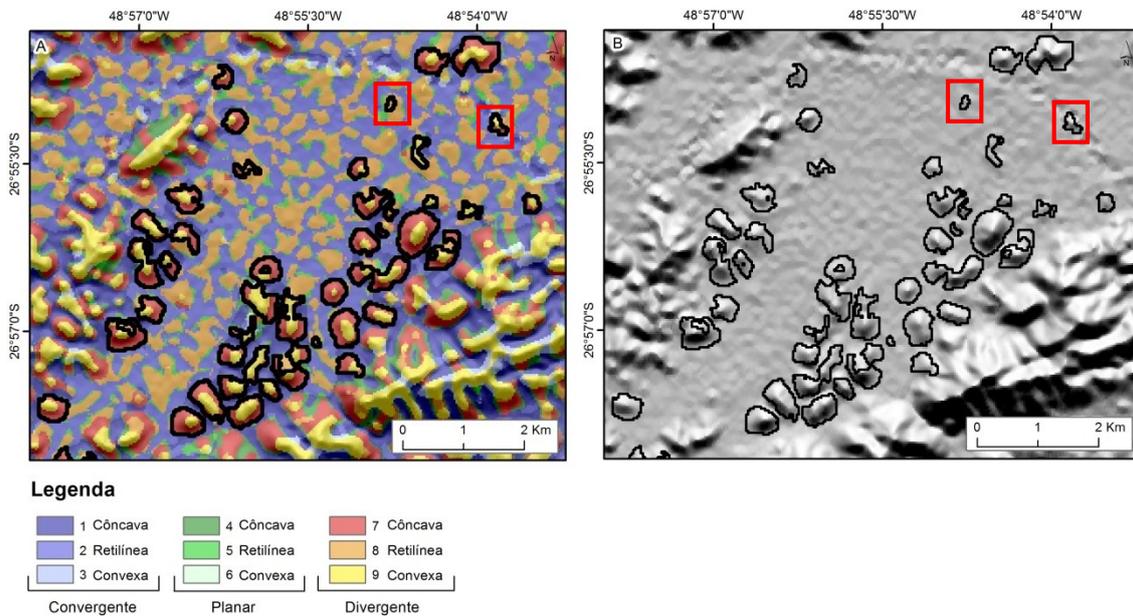
Imagem sobre perspectiva pelo Google Earth, visada de 500m de altitude em direção a nordeste com exagero vertical de 3x; posição central em 26° 36' 30" S; 49° 02' 35" W, Município de Massaranduba.

Fonte: Google Earth (2018).

Os baixos valores de altura, declividade e dissecação das colinas não favorecem a distinção do relevo plano das planícies que, em seu mapeamento (baseado em altura), são incluídas junto. Porém, seus topos arredondados e vertentes divergentes constituem uma assinatura geomorfométrica característica, de fácil distinção de seu entorno pelo critério de forma de terreno (Figura 1.1). Enquanto o restante das áreas de planície apresentou perfil retilíneo (classes 2, 5 e 8), as colinas se apresentam invariavelmente como

áreas de topo convexo-divergentes (classe 9) circundadas por vertentes côncavo-divergentes (classe 7).

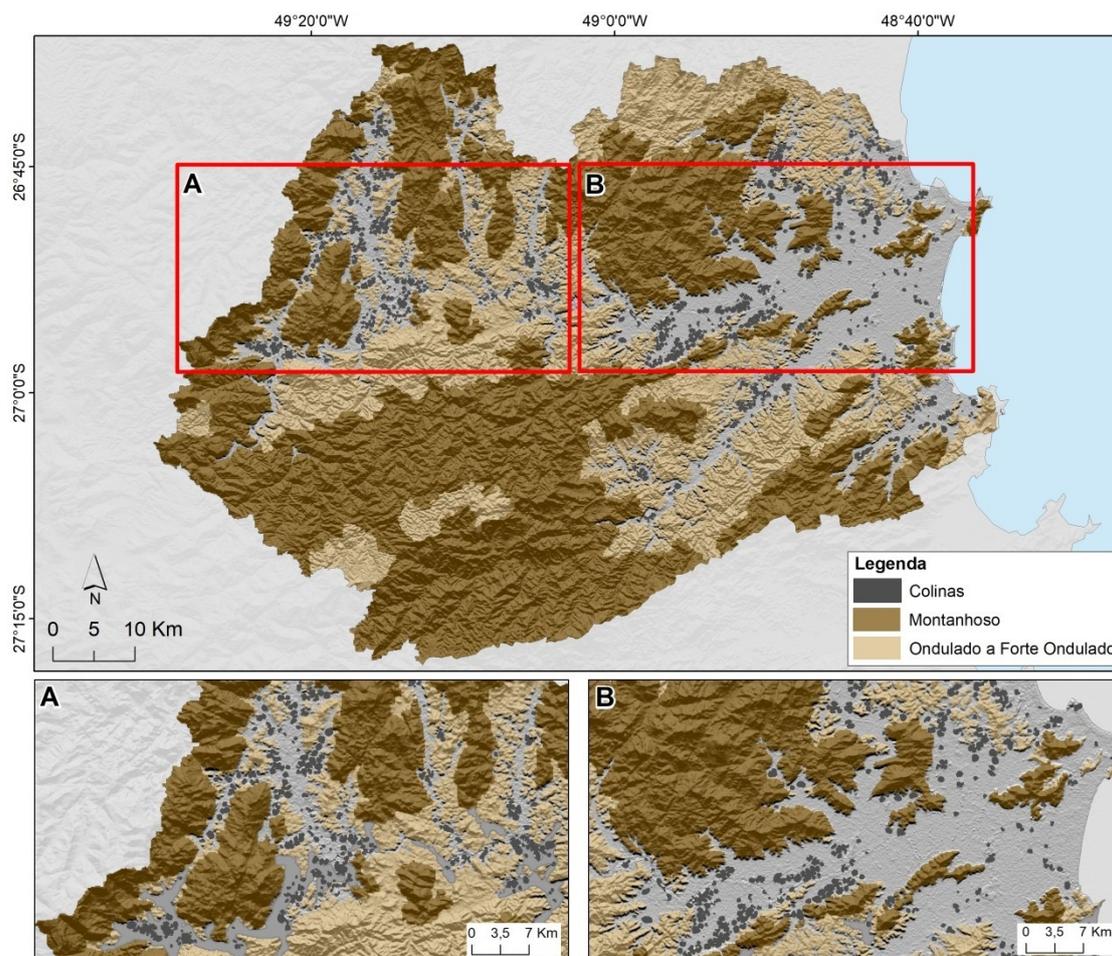
Figura 5.23 - Resultado do mapeamento de colinas a partir da forma de terreno.



Fonte: Produção do autor.

Na Figura 5.23 é possível notar que a maior parte das feições mapeadas corresponde a colinas. Apesar de o resultado obtido ser julgado satisfatório, em alguns casos, como os destacados pelos quadros vermelhos da Figura 5.23 - B encontram-se erros de inclusão. Os locais exemplificados correspondem a artefatos existentes no MDE, sendo possível notar inclusive a presença de uma feição linear situada ao nordeste da área abrangida pela Figura 5.23.

Figura 5.24 - Mapeamento final da classe de colinas.



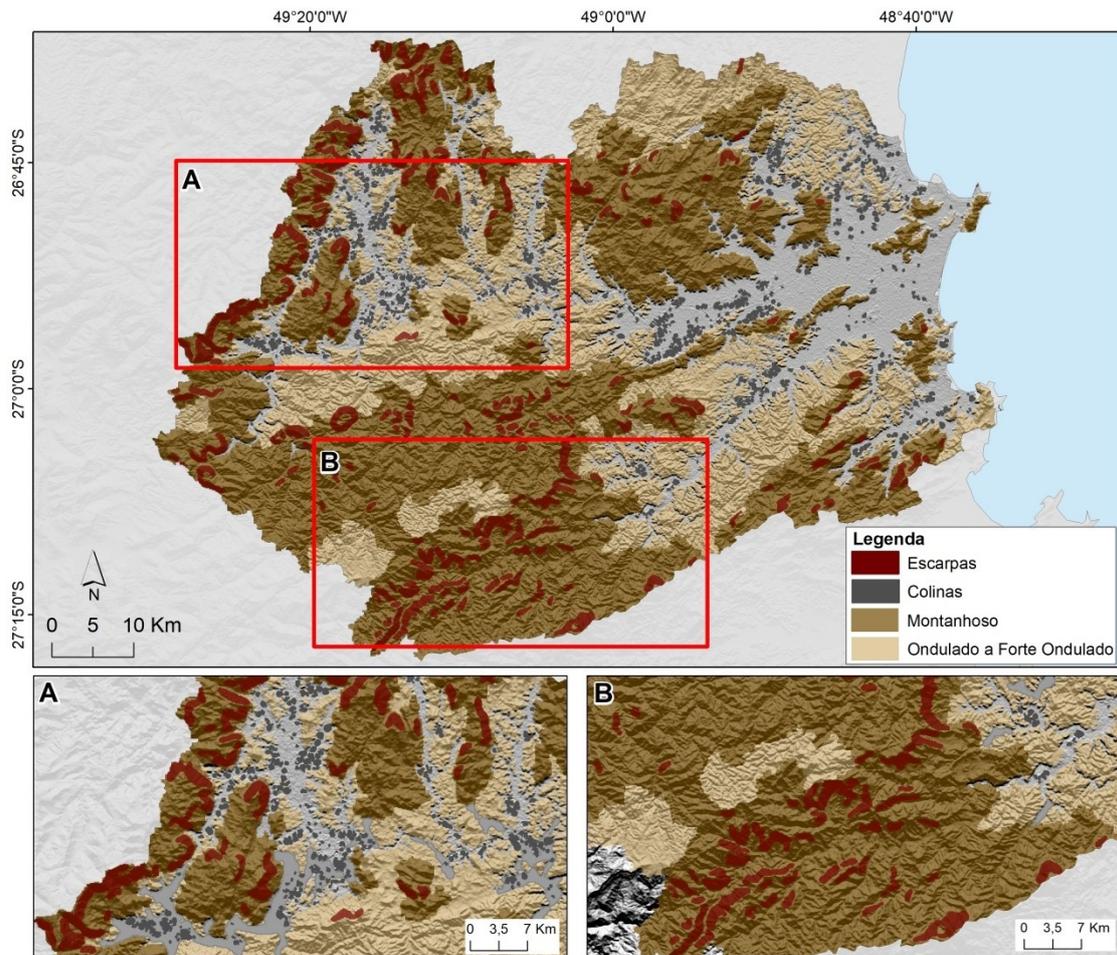
Fonte: Produção do autor.

Com os resultados gerais do mapeamento de colinas (Figura 5.24) é possível perceber a disposição espacial dessas feições mapeadas ao longo do táxon cristalino, que confirma sua localização nas adjacências de planícies, próximas ao contato com terrenos mais declivosos, com poucas exceções. Ao todo foram geradas mais de 800 feições individuais correspondentes à classe de colinas.

5.3.2 Escarpas dos terrenos cristalinos

A Figura 5.25 apresenta os resultados obtidos com os procedimentos para geração das feições de escarpas situadas nos terrenos cristalinos. É possível notar que a maior concentração dessas feições está localizada ao extremo noroeste da bacia e em uma porção sudoeste.

Figura 5.25 - Classificação das escarpas isoladas dos terrenos cristalinos.



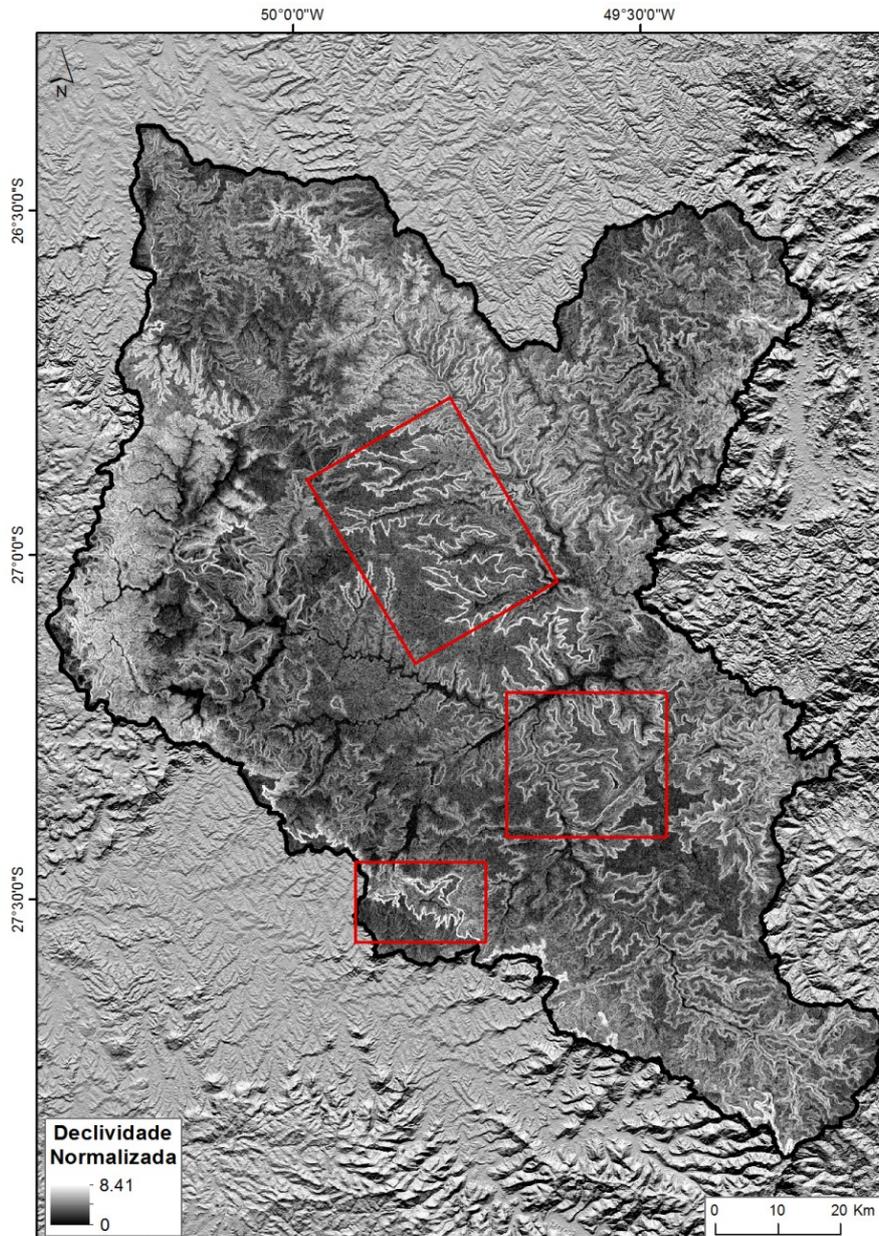
Fonte: Produção do autor.

O quadro A da Figura 5.25 ressalta feições mapeadas como escarpas que correspondem à frente de erosão que divide os terrenos cristalinos dos sedimentares fanerozóicos. No quadro B da Figura 5.25 se encontram segmentos de encostas com alta declividade que pertencem a terrenos esculpidos nas rochas do Complexo Metamórfico Brusque e de Suítes Granitóides (Granito Guabiruba) (SILVA, 1987; CPRM, 2004). É possível notar que praticamente 100% das feições de escarpas ocorreram sobrepostas a feições mapeadas como terrenos montanhosos.

5.3.3 Escarpas dos terrenos sedimentares

Na Figura 5.26 é possível visualizar o dado de declividade normalizada para os terrenos sedimentares. Percebe-se que nos terrenos sedimentares existem locais com declividade bastante acentuada (superior a 60°). A avaliação visual desse dado permitiu perceber a presença de escarpas isoladas, tais como as destacadas nos quadrados vermelhos.

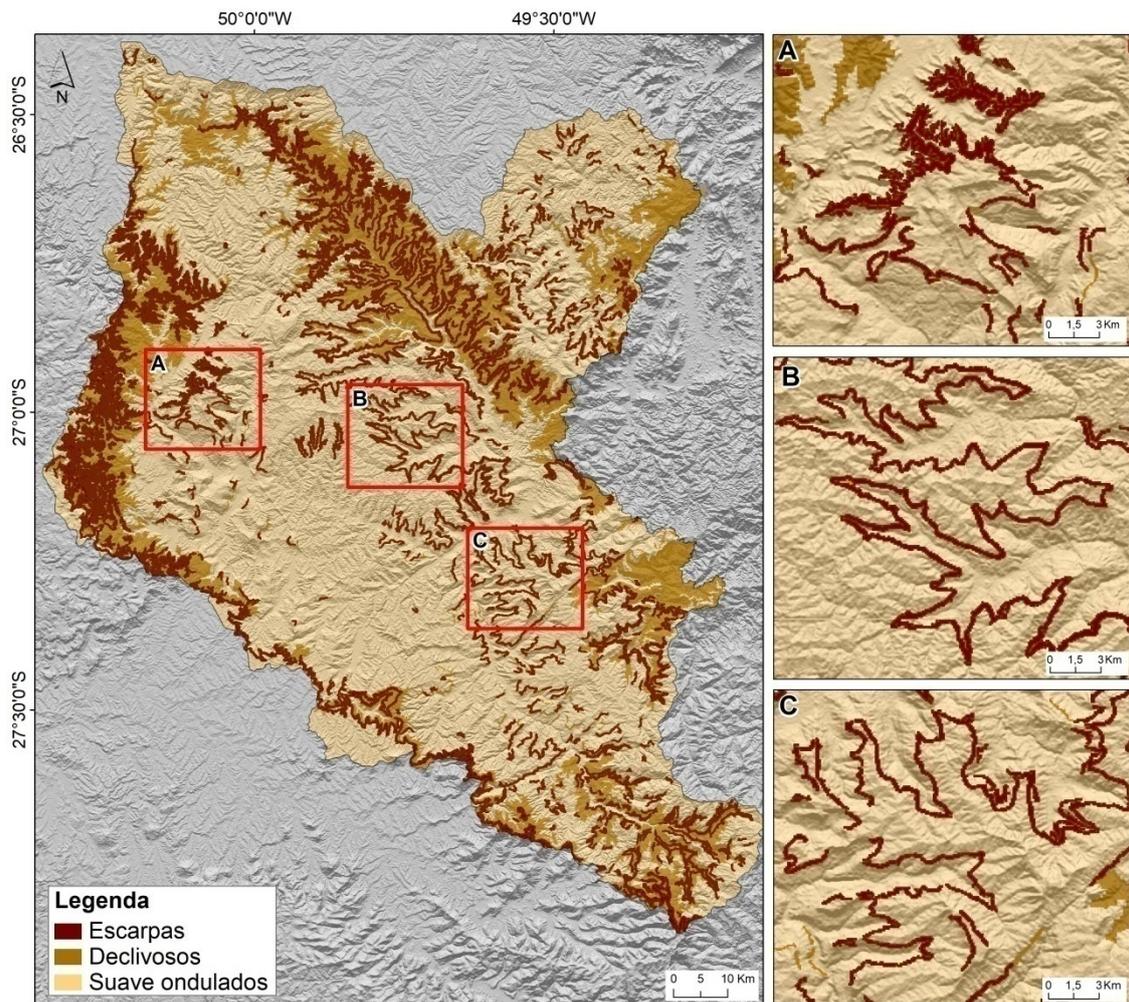
Figura 5.26 - Declividade normalizada (terrenos sedimentares).



Fonte: Produção do autor.

Na Figura 5.26, essas escarpas se caracterizam na imagem por serem feições lineares com brilho superior e, portanto contrastando-se dos terrenos à sua volta. O resultado do mapeamento das escarpas isoladas pode ser verificado na Figura 5.27. É possível notar que ao centro do domínio sedimentar não ocorre praticamente nenhuma escarpa isolada. No entanto, nas porções mais externas do domínio observa-se uma maior ocorrência dessas feições. Um número considerável de escarpas isoladas ocorre junto aos terrenos previamente mapeados como declivosos, porém, é possível perceber que há ocorrências significativas dessas feições também em terrenos cuja classificação anterior (táxon 2) considerou como suave ondulados. Ao comparar os dados obtidos com a classificação das escarpas isoladas com o mapeamento geológico pré-existente (CRPM, 2004), é possível notar que essas ocorrências de escarpas isoladas correspondem a zonas de encontro de diferentes camadas sedimentares. Pelo fato de as diferentes camadas sedimentares possuírem diferentes granulações e materiais de origem, ocorrem erosões diferenciais as quais podem acarretar na ocorrência de escarpas isoladas.

Figura 5.27 - Classificação das escarpas isoladas dos terrenos sedimentares.



Fonte: Produção do autor.

A feição de escarpa isolada retratada no quadro A da Figura 5.27 encontra-se em terrenos cuja geologia é referente à Formação Teresina. Essa formação ocorre em locais pontuais e isolados neste domínio. As feições retratadas nos quadros B e C correspondem à zona de encontro entre a Formação Taciba (a leste na Figura B e a oeste na C) e a Formação Rio Bonito (a oeste na Figura B e a leste na C), as quais podem ser observadas por meio da imagem 3D (Figura 5.28) e também no quadro B da Figura 5.27.

Figura 5.28 – Disposição 3D das escarpas.

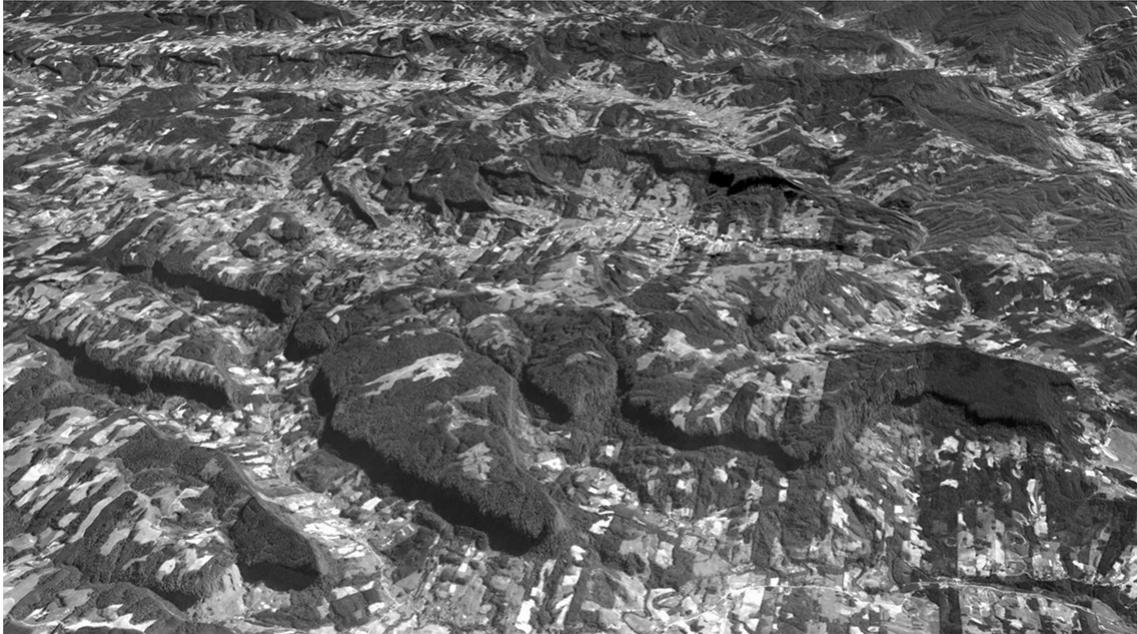


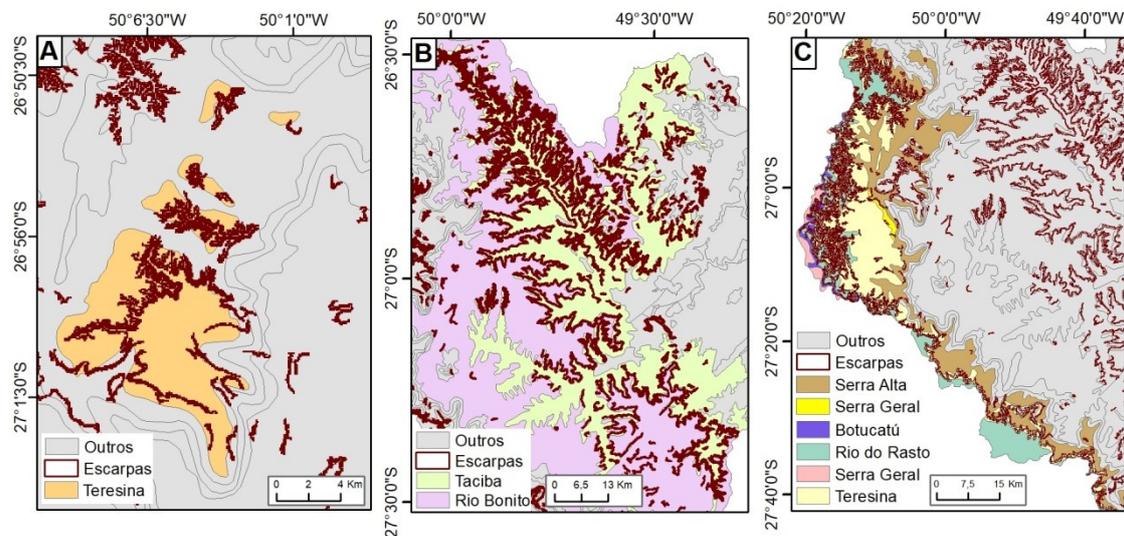
Imagem sobre perspectiva pelo Google Earth, visada de 6,8km de altitude em direção ao Norte com exagero vertical de 3x; posição central em 27° 00' S; 49° 45' W. Área urbanizada de Dona Emma no centro da imagem.

Fonte: Produção do autor.

A Figura 5.28 representa uma perspectiva tridimensional da porção retratada no quadro B da Figura 5.27. É possível observar que o terreno desta porção varia de suave a suave ondulado, sendo possível observar também a presença de atividades agrícolas e outros usos. Em primeiro plano nota-se a feição de escarpa mapeada neste trabalho, a qual corresponde a uma zona de contato entre a formação Taciba e Rio Bonito.

Conforme observado na Figura 5.29, grande parte das escarpas isoladas mapeadas nos terrenos sedimentares correspondem às zonas de contato entre diferentes formações geológicas. O quadro A da Figura 5.29 ilustra as mesmas escarpas retratadas no quadro A da Figura 5.27, em que se pode perceber a ocorrência isolada dessas escarpas em uma região pertencente à Formação Teresina (composta por sedimentos marinhos).

Figura 5.29 - Visualização das feições de escarpas isoladas em relação às formações geológicas existentes nos terrenos sedimentares.



Fonte: Produção do autor.

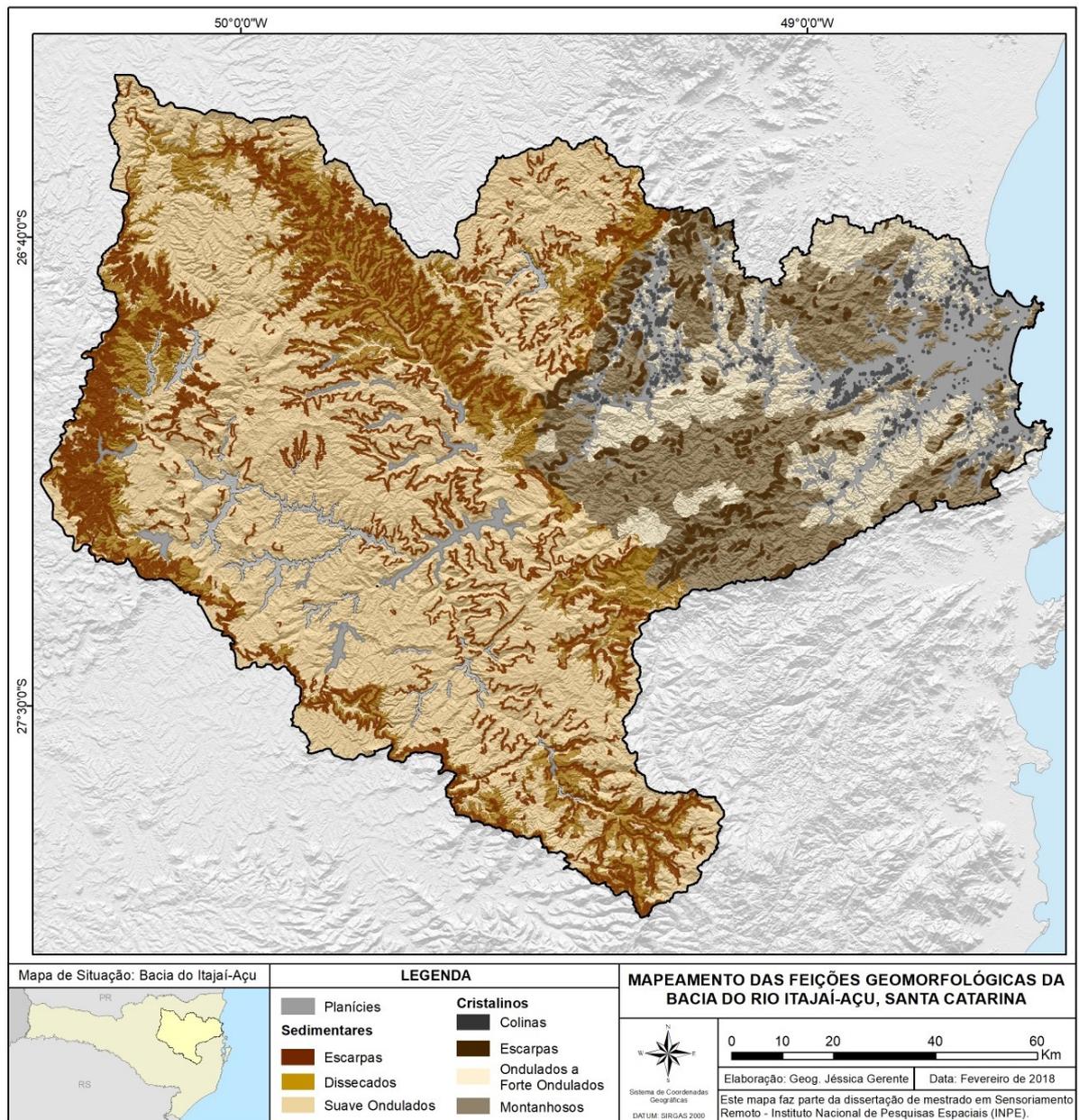
Percebe-se que as escarpas referentes à zona de contato entre Formação Taciba (constituída por sedimentos glácio-marinhos) e rio Bonito (formada por depósitos flúvio-deltáicos e marinhos), representadas no quadro B Figura 5.29, são muito expressivas em relação às demais feições mapeadas, uma vez que apresentam um perímetro maior de abrangência na bacia.

O quadro C da Figura 5.29 corresponde a um local que aflora a maior densidade de formações sedimentares na área analisada, sendo elas: Serra Alta (situada mais a leste), Teresina, Rio do Rastro e Botucatu (CRPM, 2004). Essas formações apresentam uma grande diversidade de depósitos, uma vez que ocorreram em diferentes ambientes deposicionais, tais como marinhos (Serra Alta e Teresina), depósitos fluviais e de planícies costeiras (Rio do Rastro), depósitos eólicos (Botucatu) (SILVA, 1979; SANTA CATARINA, 1986). Apenas as rochas da Formação Serra Geral, situada no extremo oeste/divisor de água, correspondem a rochas ígneas que correspondem às primeiras manifestações vulcânicas sobre os sedimentos arenosos do então deserto Botucatu (MARIMON; WILDNER; AYALA, 2014).

5.4 Mapeamento final

Neste trabalho ao todo foram mapeadas as seguintes classes: escarpas em terrenos cristalinos e sedimentares, colinas (em terrenos cristalinos), terrenos cristalinos ondulados a forte ondulados e montanhosos, terrenos sedimentares suave ondulados e dissecados e planícies. A Figura 5.30 apresenta o mapa final elaborado com todas as classes mapeadas.

Figura 5.30 – Mapa geomorfológico final obtido com os processos metodológicos desenvolvidos por este trabalho.



Fonte: Produção do autor.

Em relação ao mapeamento geomorfológico do RADAMBRASIL, o mapa gerado com os procedimentos deste trabalho (Figura 5.30) oferece um maior nível de detalhamento. Esta diferença pode ser explicada em parte pela natureza de classificação aplicada neste trabalho, gerada por processos quantitativos, em parte pela escala potencial dos dados usados (de MDE), cujo limite de detalhamento se estende além daquele oferecido pelos dados usados para o RADAMBRASIL. A missão SRTM foi projetada para fornecer MDE passível de trabalho em escalas entre 1:100.000 e 1:250.000, o que, além das possibilidades de geoprocessamento, oferece mais detalhamento do que a base de dados usada para interpretação do RADAMBRASIL que, em última instância, consiste em material analógico preparado na escala 1:250.000. No RADAMBRASIL, para a área de estudo, as classes mapeadas nos três primeiros táxons se mantêm basicamente idênticas às existentes no primeiro. Nesse mapeamento oficial, o único detalhamento existente entre o primeiro e terceiro táxon é referente à subdivisão dos depósitos sedimentares quaternários em planícies litorâneas e planícies alúvio-coluvionares.

É possível perceber na Figura 5.30 que as classes mapeadas neste trabalho, apesar de geradas de modo individualizado e por meio de processos específicos para cada uma, possuem uma distribuição espacial harmônica. Conforme relatado, as classes mais abrangentes, como as do 1º e 2º táxon, foram geradas por procedimentos mais complexos do que as feições mais específicas e detalhadas como colinas e escarpas. A tabela 5.2 apresenta uma quantificação das áreas totais de cada classe mapeada.

Tabela 5.2 - Quantificação das áreas totais mapeadas por cada classe.

Domínio Morfoestrutural	Classe	Área Total Mapeada (km²)
Planícies	-	1120,2
Terrenos cristalinos	Colinas	85,9
	Escarpas Cristalinas	228,5
	Montanhoso	2185,7
	Ondulado a Forte Ondulado	1382,9
Terrenos sedimentares	Suave Ondulado	7318,5
	Dissecado	2620,9
	Escarpas	463,9

Fonte: Produção do autor.

Conforme pode ser observado na tabela 5.2, a área total de feições pertencentes aos terrenos cristalinos é de 3.883 km² e aos terrenos sedimentares é de 10.403,3 km². As colinas possuem área média de 0,1 km², as escarpas cristalinas possuem área média de 1,2 km² e as sedimentares de 0,9 km².

A tabela 5.3 sintetiza os processos realizados para a obtenção de cada classe do mapeamento final. A partir desse quadro é possível notar as diferenças de expressão espacial das variáveis utilizadas tanto para a obtenção de unidades de terreno, como para critério de classificação. Com base nos procedimentos adotados, percebe-se que as classes mais gerais tiveram suas unidades de mapeamento (UMs) derivadas de segmentos. As classes menos generalizadas, como colinas e escarpas, foram mapeadas diretamente por uma abordagem local. Compreende-se, a partir disso, que a escolha do método e do tipo de unidade de terreno tem bastante relação com o tipo de feição a ser mapeada.

Para a distinção entre terrenos sedimentares e cristalinos, etapa que necessitou o maior grau de generalização, segmentos com tamanho 63 foram os mais satisfatórios. Estas duas classes não se mostram prontamente distintas pela observação do MDE, por ambas apresentarem padrões altamente variáveis. A comparação da distribuição geral de padrões entre estes terrenos é também desfavorecida pela excessiva generalização associada à

sua extensão, praticável visualmente a partir de 1:1.500.000 até 1:500.000. Somente com a classificação de dados geomorfométricos apoiada pelo conhecimento prévio e dados auxiliares foi possível obter uma delimitação razoável de suas fronteiras. No dado de relevo sombreado a diferença de rugosidade é o que torna mais prontamente observável as distinções entre terrenos sedimentares e cristalinos.

Para subdivisão dos terrenos cristalinos em terrenos ondulados a forte ondulados e montanhosos, utilizou-se um parâmetro de tamanho de segmentação de 13, considerando como dados de entrada as mesmas variáveis utilizadas para a distinção entre cristalino e sedimentar. Para subdivisão dos terrenos sedimentares em dissecados e suave ondulados, o fator tamanho utilizado foi 175 considerando, no entanto, a altimetria como única variável de entrada na segmentação. Em razão do comportamento altamente variável e local da altimetria, para a obtenção de segmentos representativos (*i.e.* com caráter mais generalizado) foi necessária a criação de segmentos com um parâmetro de tamanho superior. Testes preliminares utilizando segmentos com tamanhos inferiores geraram polígonos muito pequenos e com caráter visual semelhante a mapas de curvas de nível, não possuindo grande utilidade para mapeamentos regionalizados. Essas subdivisões dos terrenos cristalinos e sedimentares são observáveis, visualmente, em escalas que variam de 1:250.000 a 1:500.000.

Tabela 5.3 - Unidades de mapeamento (UMs) e método/variáveis aplicados nos processos de mapeamento das classes finais de legenda.

UM I	Método I	UM II	Método II	UM III	Método III	Legenda
segmentos de dissecação vertical e declividade (tamanho 63)	agrupamento por método hierárquico baseado na moda de faixa de declive dos segmentos	segmentos de dissecação vertical e declividade (tamanho 13)	fatiamento da frequência de textura segmentos	-	-	cristalino ondulado a forte ondulado
		segmentos de altitude (tamanho 175)	fatiamento da declividade média dos segmentos	-	-	cristalino montanhoso
				-	-	sedimentar dissecado
				-	-	sedimentar suave ondulado
janelas móveis (13x13)	elevação do MDE subtraída da altimetria mínima num raio de busca de 1,2km	-	-	-	-	planície*
-	-	-	-	local	seleção da forma local de terreno	colina*
-	-	-	-	local (filtro)	fatiamento: alta declividade regional, calculada a partir da altimetria suavizada	escarpas cristalinas*
-	-	-	-	local	fatiamento da declividade normalizada: alta declividade local, formando áreas contíguas	escarpas sedimentares*

(*): classes que se sobrepõem às demais. Planícies (e colinas) sem interseção com áreas de escarpa.

Fonte: Produção do autor.

Apesar do mapeamento das escarpas e colinas ter sido englobado em uma única etapa, seguindo um modelo hierárquico de mapeamento, em razão de suas expressões espaciais, essas feições se destacam de maneira distinta tanto em relação a variáveis geomorfométricas como em escalas de visualização. No caso das escarpas situadas em terrenos sedimentares, as quais se caracterizam por feições de encostas muito íngremes e contrastantes

do entorno, é possível perceber visualmente as escarpas mais expressivas no dado de declividade (considerando um histograma equalizado) em uma escala compatível até 1:1.000.000. Por outro lado, levando em conta a interpretação visual do dado de sombreamento do relevo, percebe-se que essas feições se evidenciam visualmente com maior clareza a partir de uma escala de 1:250.000 ou superior. As feições classificadas como 'escarpas de terrenos cristalinos', não são tão facilmente evidenciadas no dado de declividade pelo fato de seus terrenos vizinhos possuírem também declividade expressiva (gerando um menor contraste na declividade). Essas feições se mostram visíveis em escalas compatíveis a 1:1.000.000, uma vez que as mesmas ocorrem, sobretudo, junto a compartimentos geomorfológicos mais expressivos como serras.

As colinas, embora possam ser percebidas na escala de 1:250.000 como pequenas elevações pontuais formando áreas de ligeira rugosidade em meio ao padrão plano das áreas de planície, quando observadas em escalas em torno de 1:100.000 ou mais detalhadas, são facilmente distinguíveis do restante do relevo, cristalino ou sedimentar, por suas formas arredondadas.

Com base no mapeamento final obtido foi possível perceber que os dados derivados do SRTM foram capazes de gerar um detalhamento do mapeamento do RADAMBRASIL em relação, sobretudo ao 2º e 3º nível taxonômico. Fernandes (2013) também considerou o SRTM útil para o refinamento do mapeamento do RADAMBRASIL. Ao contrário dos dados disponíveis para a bacia do rio Itajaí-Açu, a área estudada por Fernandes (2013) possuía classes mapeadas para o 2º e 3º táxons. Esse autor utilizou uma abordagem de segmentação somada à mineração de dados, cuja abordagem foi também seguida por Kawata (2014) e Girão, Mello e Fernandes (2016). O presente trabalho apresenta uma alternativa à utilização de mineração de dados e outros métodos automáticos para a classificação de padrões do relevo. Isso porque os processos de decisão, sobretudo voltados à classificação dos padrões, foram considerados a partir de extensas análises visuais, experimentos e consulta a dados auxiliares, que subsidiaram a escolha das variáveis e dos procedimentos aplicados no mapeamento de cada classe de interesse.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho buscou desenvolver metodologias para o mapeamento de feições do relevo da bacia do rio Itajaí-Açu a partir da utilização de descritores geomorfométricos. Foram considerados três táxons de mapeamento, o qual requereu análises em escalas progressivamente detalhadas a partir da escala mais geral. A análise dos resultados propiciou as seguintes conclusões:

- Os procedimentos adotados com as variáveis geomorfométricas derivadas do SRTM/Topodata permitiram a realização de análises qualitativas e quantitativas do relevo. Essas análises resultaram na identificação de distintos padrões de relevo a partir dos quais foram criadas classes para a categorização de feições de relevo relativas a três táxons de análise. Embora o trabalho tenha focado padrões observados em unidades de mapeamento com técnicas de generalização, as classes criadas permitiram a obtenção de dados mais detalhados que os disponíveis no mapa geomorfológico RADAMBRASIL, sobretudo no que diz respeito à lacuna de detalhamento que existe no segundo e terceiro táxons para a região que compreende a bacia do rio Itajaí-Açu/SC.

- No primeiro táxon de análise foram mapeadas três classes: planícies, terrenos cristalinos e terrenos sedimentares. Pelo fato da existência de poucas classes, esta etapa do trabalho foi a de maior complexidade, uma vez que exigiu um maior esforço de generalização. Para a classificação das planícies, tendo em vista as características da área de estudo, a escala de mapeamento (compatível com 1:1.000.000) e a resolução dos dados utilizados, a altura topográfica calculada numa janela móvel circular de aproximadamente 1,2km foi a variável considerada mais satisfatória. Este procedimento permitiu acrescentar áreas de planície não reconhecidas como tal no mapa geomorfológico oficial (RADAMBRASIL). Essas inclusões foram verificadas e validadas a partir da observação visual do MDE e de perfis topográficos, bem como a observação de imagens de alta resolução. Para a classificação dos terrenos cristalinos e sedimentares, a moda entre intervalos regulares de declividade foi o atributo que proporcionou os melhores resultados gerais. Diante de ocasionais áreas de confusão resultantes do emprego desta variável,

a distribuição da média de altimetria em segmentos (em contraposição à distribuição da altimetria local) favoreceu sua reclassificação em estratos distintos, mais coerentes com as características geomorfológicas da bacia, e correspondentes aos dois principais domínios morfoestruturais. Os padrões classificados neste táxon de análise refletiram a disposição geral de classes presentes no mapeamento RADAMBRASIL, com taxas de correspondência superiores a 80%.

- No segundo táxon foram realizadas subdivisões dos terrenos cristalinos nas classes “terrenos montanhosos” e “terrenos ondulados a forte ondulados” e dos terrenos sedimentares nas classes “terrenos suave ondulados” e “terrenos dissecados”. Para a subdivisão dos terrenos cristalinos foi utilizado como método de classificação um fatiamento da frequência da textura média por segmento. Para a subdivisão dos terrenos sedimentares o método de classificação utilizado foi um fatiamento dos valores médios de declividade por segmento.

- No terceiro táxon foram mapeadas feições denominadas de escarpas isoladas nos terrenos cristalinos e sedimentares. Feições classificadas como colinas também foram mapeadas em porções dos terrenos cristalinos. O fatiamento da declividade obtida sob diferentes graus de generalização do MDE (por filtragem média) foi o método mais simples e satisfatório para o mapeamento das escarpas. Para o mapeamento de colinas, a associação das classes convexo-divergentes e côncavo-divergentes da forma do terreno local foi suficiente.

- Destaca-se a importância do processo de segmentação para a definição de unidades de mapeamento, as quais foram base para todo processo de generalização de variáveis geomorfométricas e classificações. Neste trabalho, a segmentação foi uma das etapas mais complexas e que exigiu o maior número de testes de modo a definir os parâmetros mais coerentes com os padrões de relevo observáveis. Entre as variáveis testadas, a dissecação vertical e a declividade normalizadas foram consideradas as mais satisfatórias para a constituição de unidades de mapeamento em escala compatível ao primeiro táxon e à subdivisão dos terrenos cristalinos já no segundo táxon.

Para a subdivisão dos terrenos sedimentares, a altimetria foi a variável mais satisfatória para a definição de unidades de mapeamento.

- Os experimentos realizados confirmam a importância da normalização de variáveis geomorfológicas com curtose ou assimetria em sua distribuição estatística para definição de segmentos. A utilização de variáveis geomorfológicas normalizadas resultou em polígonos maiores e mais homogêneos do que aqueles obtidos com as mesmas variáveis em suas distribuições originais.

- Em relação aos métodos tradicionais de mapeamento, a abordagem apresentada se mostra como uma boa alternativa ao permitir a exploração e extração de informações quantitativas do terreno. Os procedimentos metodológicos deste trabalho foram parcialmente automáticos e a escolha de cada variável e método para classificação foi estabelecida a partir das características de padrões observáveis nos descritores geomorfológicos em cada uma das diversas instâncias do mapeamento. A variedade de decisões metodológicas e intervenções propositais adotadas ao longo do mapeamento permite concluir pela imprescindibilidade da intervenção humana com base em conhecimentos e observação dos dados para o desempenho das técnicas utilizadas, com vantagens sobre sua (pressuposta) aplicação automática e parametrização exclusivamente estatística, tais como mineração de dados e suas variações.

- Para a adoção desta abordagem em outras áreas de estudo, recomenda-se o mesmo tipo de desenvolvimento metodológico – ciclos de testes com variáveis potencialmente úteis, verificações visuais, delimitação de unidades de mapeamento, caracterização geomorfológica e classificação – uma vez que as características e peculiaridades da área mostraram-se decisivas para a escolha das variáveis e dos métodos de análise.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARGENTO, M.S.F. Mapeamento geomorfológico. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (Eds.). **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1994.
- BASEI, M. A. S. et al. Polycyclic evolution of Camboriú Complex migmatites, Santa Catarina, Southern Brazil: integrated Hf isotopic and U-Pb age zircon evidence of episodic reworking of a Mesoarchean juvenile crust. **Brazilian Journal of Geology**, v. 43, p. 427-443, 2013.
- BISHOP, M. P.; JAMES, L. A.; SHRODER, J. F.; WALSH, S. J. Geospatial technologies and digital geomorphological mapping: concepts, issues and research. **Geomorphology**, v.137, n.1, p.5-26, 2012.
- CARMAGO, F. F. **Análise orientada ao objeto aplicada ao mapeamento de unidades geomorfológicas a partir de dados ASTER/Terra**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2008.
- COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (CPRM). **Geobank**: carta geológica do Brasil ao milionésimo: folha SG22, Curitiba. Brasília: CPRM, 2004. Escala 1:1.000.000. Disponível em: <<http://geobank.sa.cprm.gov.br/>>.
- CSILLIK, O.; EVANS, I.S.; DRĂGUȚ, L. Transformation (normalization) of slope gradient and surface curvatures, automated for statistical analyses from DEMs. **Geomorphology**, v.232, p.65–77, 2015.
- DENT, D.; YOUNG, A. **Soil survey and land evaluation**. London: Allen and Unwin, 1981. 278p.
- DIKAU, R. Derivatives from detailed geoscientific maps using computer methods. **Zeitschrift für Geomorphologie**, v.80, p. 45-55, 1990.
- DRĂGUȚ, L.; BLASCHKE, T. Automated classification of landform elements using object-based image analysis. **Geomorphology**, v. 81, n. 3/4, p.330-344, 2006.
- DRĂGUȚ, L.; EISANK, C. Object representations at multiple scales from digital elevation models. **Geomorphology**, v.129, n.3/4, p.183–189, 2011.
- DRĂGUȚ, L.; CSILLIK, O.; EISANK, C.; TIEDE, D. Automated parameterization for multi-scale image segmentation on multiple layers. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.88, p.119, 2014.

EISANK, C.; SMITH, M.; HILLIER, J. Assessment of multiresolution segmentation for delimiting drumlins in digital elevation models. **Geomorphology**, v.214, p.452–464, 2014.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - SOLOS. **Solos do Estado de Santa Catarina**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2004. 721 p. 1 mapa, color., Escala 1:250.000.(Embrapa Solos. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, n 46).

ESRI. **ArcGIS desktop**: Release 10. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute, 2011.

EVANS, I. S. General geomorphometry, derivations of altitude and descriptive statistics. In: CHORLEY, R. J. (Ed.). **Spatial analysis in geomorphology**. London: Butler & Tanner, 1972. p. 17–90.

EVANS, I. S. General geomorphometry. In: GOUDIE, A. (Ed.). **Geomorphological techniques**. London: George Allen & Unwin, 1981. p. 31–37.

FERNANDES, P. J. **Aplicação de dados SRTM ao mapeamento geomorfológico regional**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013.

FORNARI, A. **Geologia e metalogênese da porção meridional do Cráton Luís Alves/SC**. 1998. 136p. Tese (Doutorado em Geociências) - Universidade de Campinas, Campinas, 1998.

GIRÃO, R.; MELLO, C. L.; FERNANDES, P. J. F. Mapeamento geomorfológico da Bacia Hidrográfica do Rio São João (RJ) por análise de imagens orientada a objeto e mineração de dados. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 17, p. 3-21, 2016.

GOOGLE. **Google Earth pro**. Version 7.3.2017. Disponível em: <<https://www.google.com.br/earth>>.

HARTMANN, L.A.; SILVA, L.C; ORLANDI FILHO, V. O complexo granulítico de Santa Catarina: descrição e implicações genéticas. **Acta Geológica Leopoldensia**, v.3, n.6, p.93-112, 1979.

HENGL, T. Finding the right pixel size. **Computers and Geosciences**, v.32, p.1283-1298, 2006.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual técnico de geomorfologia**. Rio de Janeiro: IBGE, 2009.(Manuais técnicos em geociências).

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Topodata**: banco de dados geomorfométricos do Brasil. São José dos Campos: INPE, 2008;Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/topodata>>.

IWAHASHI, J.; PIKE, R.J. Automated classifications of topography from DEMs by an unsupervised nested-means algorithm and a three-part geometric signature. **Gemorphology** ,v.86, p.409–440, 2007.

JET PROPULSION LABORATORY. **Jet Propulsion Laboratory, NASA**. 2017. Disponível em: <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm>. Acesso em:jan. 2017.

KAWATA, L. T. **Análise de imagens baseada em objetos geográficos (GEOBIA) aplicada ao mapeamento da transição entre cinturão orogênico do atlântico e bacia sedimentar do Paraná**. Dissertação (Mestrado em Geografia Física) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

KELLNDORFER, J. M.; WALKER, W. S.; PIERCE, L. E.; DOBSON, M. C.; FITES, J.; HUNSAKER, C.; VONA, J.; CLUTTER, M. Vegetation height derivation from shuttle radar topography mission and national elevation data sets. **Remote Sensing of Environment**,v.93, p.339-358, 2004.

KRIEGER, G. et al. TanDEM-X: a radar Interferometer with two formation-flying satellites. **Acta Astronautica**, v.89, p. 83-98, 2014.

KRIEGER, G.; MOREIRA, A.; FIEDLER, H.; HAJNSEK, I.; WERNER, M.; YOUNIS, M.; ZINK, M. TanDEM-X: a satellite formation for high resolution SAR interferometry. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.45, n.11, p. 3317-3341, 2007.

LE TOAN, T.; BEAUDOIN, A.; RIOM, J.; GUYON, D. Relating forest biomass to SAR data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**,v.30, p.403–411, 1992.

LEHNER, B.; DÖLL, P. Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands. **Journal of Hydrology**, v. 296, n. 1/4, p.1-22, 2004.

LUIZ, E. L. Geomorfologia. In: SANTA CATARINA. SECRETARIA DE ESTADODO PLANEJAMENTO. **Atlas geográfico de Santa Catarina: diversidade da natureza**. Florianópolis: UDESC, 2014. p. 91-108.

MARIMON, M.P.C.; WILDNER, W.; AYALA, L. Geologia. In: SANTA CATARINA. SECRETARIA DE ESTADODO PLANEJAMENTO. **Atlas geográfico de Santa Catarina: diversidade da natureza**. Florianópolis: UDESC, 2014. p. 45-68.

MARK, D. M. From land form to landforms: bridging the quantitative-qualitative gap in a multilingual context. In: PURVES, R.; GRUBER, S.; STRAUMANN, R.; HENGL, T.(Eds.). **Proceedings of Geomorphometry**. Zurich: University of Zurich, 2009. p. 13–16.

MARK, D. M. Geomorphometric parameters: a review and evaluation. **Geografiska Annaler. Series A, Physical Geography**, v. 57, n. 3/4, p. 165–177, 1975.

MILANI, E. J.; MELO J. H. G.; SOUZA P. A.; FERNANDES L. A.; FRANÇA, A.B. Bacia do Paraná. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, Rio de Janeiro, v.15, n.2, p. 265-287,2007.

MINAR, J.; EVANS, I.S. Elementary forms for land surface segmentation: the theoretical basis of terrain analysis and geomorphological mapping. **Geomorphology**, v.95, p.236–259, 2008.

MONTEIRO, M.A. Caracterização climática de Santa Catarina: uma abordagem dos principais sistemas atmosféricos que atuam durante o ano. **Geosul**, Florianópolis, v.16, n.31, p. 69-78, jan./jun. 2001.

MOORE, I. D.; LEWIS, A.; GALLANT, J. C. Terrain attributes: estimation methods and scale effects. In: JAKEMAN, A. J.; BECK, M.B.; McALEER, M. J. **Modelling change in environmental systems**. New York: John Wiley and Sons, 1993. p.189-214.

MUÑOZ, V.A.; VALERIANO, M. M. Mapping of floodplain by processing of elevation data from Remote Sensing. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR MATHEMATICAL GEOSCIENCES. **Proceeding**. Berlin: Springer-Verlag, 2013. p. 481-484.

MUÑOZ, V. A. **Mapeamento de planícies de inundação a partir de dados SRTM: contribuições para análise de exposição a inundações na bacia do rio Itajaí**. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2014.

MUÑOZ, V. A.; VALERIANO, M. M. Mapeamento da predominância topográfica através do processamento de dados SRTM como contribuição ao mapeamento de solos. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 7., 2008, Belo Horizonte (MG). **Anais**. Belo Horizonte: IAG/UFMG, 2008. 1 DVD

NASA. **Advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer**. Pasadena, California, 2004. Disponível em: www.asterweb.jpl.nasa.gov. Acesso em: dez. 2016.

PIKE, R. J.; WILSON, S. E. Elevation-relief ratio, hypsometric integral, and geomorphic area-altitude analysis. **Bulletin of the Geological Society of America**, v. 82, n. 4, p. 1079–1084, 1971.

PIKE, R.J. Geomorphometry: diversity in quantitative surface analysis. **Progress in Physical Geography**,v.24, n.1, p.1–20, 2000.

PIMENTA, M. L. F.; CRONEMBERGUER, F. M.; MORAIS, N. B.; VICENS, R. S. Mapeamento de formas de relevo utilizando análise orientada a objetos e modelagem do conhecimento em modelos digitais de elevação. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 8., 2010, Recife. **ANAIS**. 2010.

PIMENTA, M. L. F.; SARTI, T. P. O mapeamento geomorfológico no IBGE e suas perspectivas metodológicas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2015, João Pessoa. **Anais**. São José dos Campos: INPE, 2015.

R CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2013. Disponível em: <http://www.R-project.org/>.

RABUS, B.; EINEDER, M.; ROTH, A.; BAMLER, R. The shuttle radar topography mission: a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. **Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 57, n. 4, p. 241-262, 2003.

RADAMBRASIL. **Folhas SF.23/24 Rio de Janeiro/Vitória**. Rio de Janeiro: Ministério das Minas e Energia, 1983. 780 p. (Levantamento de Recursos Naturais, 32).

RIBAS JUNIOR, S. **Retratos de Santa Catarina**. 6 ed. Florianópolis: Retratos, 2005. 212 p.

RIEGLER, G.; HENNING, S. D. WorldDEM™: a new era of global elevation information. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 17., 2015, João Pessoa, PB. **Anais**. São José dos Campos, SP: INPE, 2015. p. 7603-7610.

SANTA CATARINA. CENTRO DE INFORMAÇÕES DE RECURSOS AMBIENTAIS E DE HIDROMETEOROLOGIA. **Mapas digitais de Santa Catarina**. Florianópolis: EPAGRI/CIRAM, 2017. Disponível em: <http://ciram.epagri.sc.gov.br/mapoteca/>.

SANTA CATARINA. GABINETE DE PLANEJAMENTO E COORDENAÇÃO GERAL. **Atlas de Santa Catarina**. Florianópolis: GAPLAN, 1986.

SANTOS, A. M.; FRANK, B. **Construindo o futuro da bacia**. Blumenau: Fundação Agência de Água do Vale do Itajaí, 2006.

SIGA JÚNIOR, O. **Domínios tectônicos do sudeste do Paraná e Nordeste de Santa Catarina**: geocronologia e evolução crustal. 1995. 212 p. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

SILVA, L. C. Geologia da bacia do Paraná em Santa Catarina. In: SILVA, L. C. E BORTOLUZZI, C. A. (Eds). **Textos básicos de geologia e recursos minerais de Santa Catarina**: mapa geológico do estado de Santa Catarina. Escala 1:500.000. Florianópolis: DNPM, 1987.

STRAHLER, A. N. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. **Bulletin of the Geological Society of America**, v. 63, p. 1117-1142, 1952.

TACHIKAWA, T. et al. **GDEM validation (2011) ASTER global digital elevation model version 2**: summary of validation results. Disponível em: <https://lpdaac.usgs.gov/>. Acesso em: dez. 2016.

TOUTIN, T. ASTER DEMs for geomatic and geoscientific applications: a review, **International Journal of Remote Sensing**, v.29, n.7, p.1855-1875, 2008. DOI:10.1080/01431160701408477.

TRIMBLE. **eCognition developer**: release 9.0. Munich: Trimble Germany, 2014.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **STRM documentation**. 2003. Disponível em: https://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2_1/Documentation/SRTM_Topo.pdf. Acesso em: fev. 2018.

VALERIANO, M. M. **TOPODATA**: guia para utilização de dados geomorfológicos locais. São José dos Campos: INPE, 2008. 72p. (INPE-15318-RPQ/818).

VALERIANO, M.M.; ALBUQUERQUE, P. C. G. **Topodata**: processamento dos dados SRTM. São José dos Campos: INPE, 2010. 79 p. Disponível em: <http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/37FCH9B>>. Acesso em: dez. 2016.

VALERIANO, M. M.; KUPLICH, T. M.; STORINO, M.; AMARAL, B. D.; MENDES JÚNIOR, J. N.; LIMA, D. J. Modeling small watersheds in Brazilian Amazonia with shuttle radar topographic mission-90m data. **Computers & Geosciences**, v. 32, n.8, p. 1169-1181, 2006.

VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F. Topodata: brazilian full coverage refinement of SRTM data. **Applied Geography (Sevenoaks)**, v. 32, p. 300-309, 2012.

VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F. Regionalization of local geomorphometric derivations for geological mapping in the sedimentary domain of central Amazônia. **Computers & Geosciences**, v. 100, p. 46-56, 2017.

WILSON, P.J.; GALLANT, C.J. **Terrain analysis: principles and applications**. New York: John Wiley and Sons, 2000. 520p.

WOOD, W. F.; SNELL, J. B. **A quantitative system for classifying landforms**. Natick, Massachusetts: Quartermaster Research and Engineering Command, 1960. 20 p.