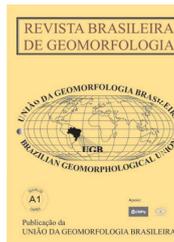


www.ugb.org.br
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 19, nº 3 (2018)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v19i3.1387>



REGIONALIZAÇÃO DE VARIÁVEIS GEOMORFOMÉTRICAS PARA O MAPEAMENTO DOS DOMÍNIOS MORFOESTRUTURAIS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO ITAJAÍ-AÇU (SC)

REGIONALIZATION OF GEOMORPHOMETRIC DATA FOR THE MORPHOSTRUCTURAL DOMAIN MAPPING IN THE ITAJAÍ-AÇU RIVER BASIN (SC)

Jéssica Gerente

*Divisão de Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Av. dos Astronautas, 1758, São José dos Campos, São Paulo. CEP: 12.245-970. Brasil
E-mail: jessicagerente@gmail.com*

Márcio de Morisson Valeriano

*Divisão de Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Av. dos Astronautas, 1758, São José dos Campos, São Paulo. CEP: 12.245-970. Brasil
E-mail: marcio.valeriano@inpe.br*

Eder Paulo Moreira

*Divisão de Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Av. dos Astronautas, 1758, São José dos Campos, São Paulo. CEP: 12.245-970. Brasil
E-mail: eder@dsr.inpe.br*

Informações sobre o Artigo

Data de Recebimento:
25/01/2018
Data de Aprovação:
07/03/2018

Palavras-chave:

Geomorfometria, Padrões de Relevo, Classificação.

Keywords:

Geomorphometry, Relief patterns, Classification.

Resumo:

O presente trabalho apresenta uma metodologia de classificação de padrões do relevo da bacia do rio Itajaí-Açu (SC) por meio da análise regional de dados geomorfométricos. A escala de análise deste trabalho é compatível com o primeiro táxon do mapeamento geomorfológico preconizado pelo RADAMBRASIL (1971), aqui usado como referência para avaliação dos resultados. A partir de observações sobre o MDE e o mapeamento de referência, foram experimentadas diferentes variáveis geomorfométricas e técnicas de processamento para a classificação de cada padrão de relevo observado. No caso das planícies, a altura foi a variável de melhor desempenho na delimitação direta pela aplicação de um limiar máximo, embora outras variáveis (amplitude, curvatura e declividade) também apresentassem padrões singulares para esta classe de terreno. Para o mapeamento das classes de terrenos cristalinos e terrenos sedimentares fanerozóicos, foram geradas unidades de mapeamento a partir da segmentação das variáveis declividade e dissecação vertical normalizadas. A classificação das unidades de mapeamento foi realizada por meio de análise de agrupamento. Foram testados o agrupamento de oito diferentes variáveis geomorfométricas (atributos) e

para área de estudo considerou-se a moda de intervalos de declividade como a mais satisfatória. Após a escolha do atributo, realizou-se ainda um reagrupamento dos segmentos por contiguidade espacial e posterior classificação por meio de um limiar de altimetria média. Os padrões classificados refletiram a disposição geral de classes presentes no mapeamento RADAMBRASIL com correspondência em relação às classes mapeadas superior a 80%.

Abstract:

This paper presents an application of SRTM data and geomorphometric derivatives on regional analysis to identify relief patterns in the Itajaí-Açu basin (SC, Brazil). The scale of this study is compatible with the first taxon (morphostructural domain) present in the RADAMBRASIL geomorphological map (1971), which was used as a reference for evaluating our results. Based on visual examinations of the DEM, different geomorphometric variables and image processing techniques were used to map each of the observed relief pattern. For the plain domain (flat terrain), topographic height was the most satisfactory data to the automatic delimitation through slicing with a threshold of 13 meters, despite other variables such as elevation range, curvature and slope also suggesting good results. In the sedimentary fanerozoic and crystalline domains, mapping units were created through segmentation of slope and vertical dissection normalized data. The mapping units were classified through cluster analysis. It were evaluated eight different geomorphometric variables (attributes) and for the study area it were considered the clustering of modal slope intervals as satisfactory. After the attribute selection, the segments were regrouped by spatial contiguity and subsequent classification by a altitude mean threshold. The correspondence between the classification and the reference map (RADAMBRASIL) was superior to 80% in all classes.

1. Introdução

Para fins de mapeamento geomorfológico é necessário que haja a transformação da informação contínua presente na superfície da Terra em entidades isoladas, as quais podem ser chamadas de unidades de relevo (DRAGUT; EISANK, 2011). Unidades de relevo são porções da superfície terrestre que possuem similaridades em formas, processos, gênese ou outros fatores (DENT e YOUNG, 1981; LANG e BLASCHKE, 2009).

Uma maneira de compartimentar o relevo é a partir da utilização de modelos digitais de elevação (MDE) e suas derivadas. No entanto, células (*pixels*) isoladas não possuem nenhum significado direto com feições presentes na superfície terrestre. Desta maneira, para formar uma estrutura de entidades individualizadas (unidades) a partir de um MDE, é necessário que haja a transformação da informação local representada em *pixels* para uma informação regionalizada, a qual pode ser representada por segmentos (DRAGUT e EISANK, 2011). Para o processo de regionalização, muitas vezes são necessários procedimentos de degradação e generalização (HENGL, 2006).

De acordo com Minár e Evans (2008), a comparação de diferentes abordagens para segmentação

do relevo evidencia feições em comum e permite o desenvolvimento de uma ampla base teórica para caracterização destas unidades e suas fronteiras. De acordo com esses autores, 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.

Valeriano e Rossetti (2017) apresentam uma metodologia para regionalização de variáveis geomorfométricas locais da planície sedimentar da Amazônia Central. Nesse trabalho, os autores estabeleceram processos metodológicos para criação de unidades de mapeamento em conformidade com a natureza das unidades sedimentares, portanto segmentos baseados na similaridade dos dados de elevação. Diversas técnicas, sobretudo consultas estatísticas, foram aplicadas para atribuição de valores únicos de declividade, perfil de curvatura absoluta e relevo relativo em cada unidade. Como resultado, os autores obtiveram mapas geomorfométricos regionais (escalas de 1:1.000.000 a mais gerais) da área estudada para posterior interpretação e mapeamento geológico.

A partir da abordagem apresentada por Valeriano e Rossetti (2017) e tendo em vista a importância de se estudar processos metodológicos para a segmentação

e mapeamento do relevo a partir de MDE, o presente trabalho tem o objetivo de apresentar uma nova abordagem metodológica para a regionalização de variáveis geomorfométricas locais e classificação dos padrões de relevo existentes na bacia do Itajaí-Açu.

2. Localização e Características Da Área De Estudo

A área de estudo 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 e 27°52'32" S (Figura 1).

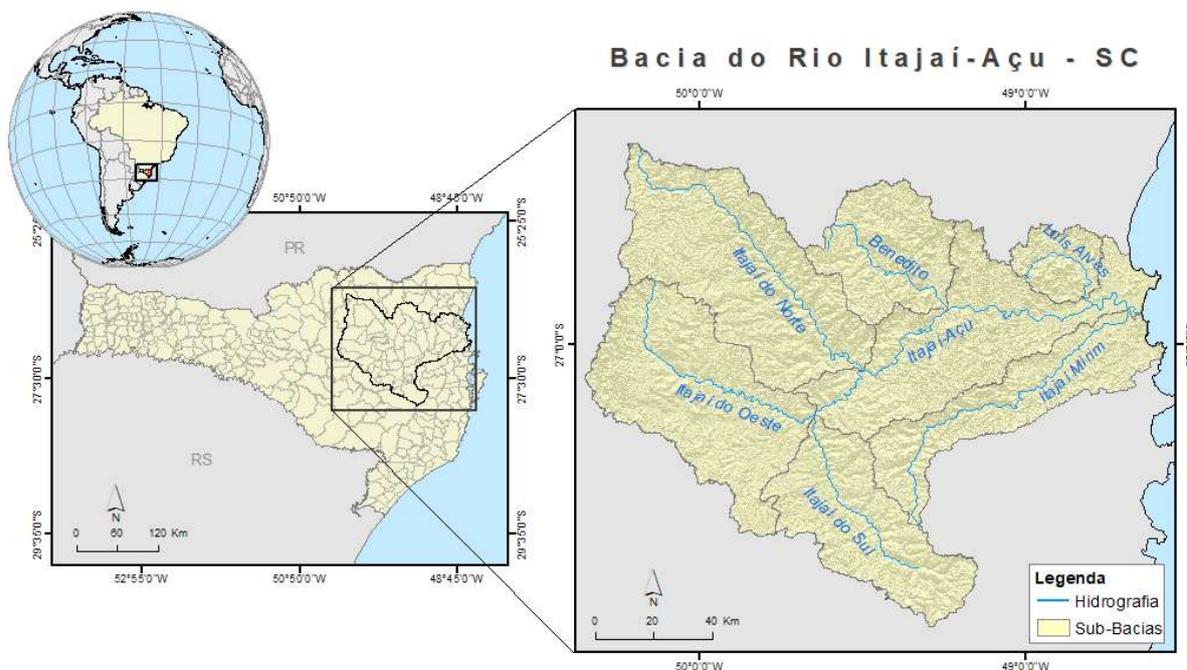


Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo - bacia do rio Itajaí-Açu, Santa Catarina (SC), Brasil.

De acordo com o mapeamento geomorfológico do RADAMBRASIL, há na área de estudo três classes relativas ao primeiro táxon (domínios morfoestruturais): Bacias e Coberturas Sedimentares Fanerozóicas (BCSF), Crátoms Neoproterozóicos (CN) e Depósitos Sedimentares Quaternários (DSQ). Estas classes predominam com a mesma delimitação até o terceiro nível taxonômico (unidades geomorfológicas), em que a classe DSQ é subdividida em Planícies Alúvio-Coluvionares e Planícies Litorâneas.

Os DSQ da área de estudo que correspondem às planícies alúvio-coluvionares possuem modelados em superfícies plana a convexa, com leve rampeamento em direção ao litoral. Já as planícies litorâneas na área de estudo são formadas por sedimentos flúvio-marinhos e concentram-se nas áreas adjacentes ao oceano Atlântico (SANTA CATARINA, 1986).

O domínio BCSF, situado na porção oeste da bacia, é o mais expressivo da área de estudo, ocupando uma área de cerca de 9.300 km². Modelado em rochas

sedimentares com estrutura concordante horizontal a sub-horizontal, apresenta, em algumas áreas, rios fortemente encaixados no relevo, em outras, situadas mais ao centro desta unidade, predominam vales abertos formando planícies (LUIZ, 2014).

Na região leste da bacia ocorre o domínio CN, o qual corresponde à unidade Serras do Tabuleiro – Itajaí, também denominadas de Serras do Leste Catarinense. Sendo o segundo compartimento mais expressivo da bacia, possuindo cerca de 4.500 km². Seu relevo se apresenta fortemente ondulado e montanhoso, esculpido em uma litologia bem diversificada que abrange rochas do embasamento cristalino compostas por rochas plutônicas, vulcano-sedimentares e metamórficas (LUIZ, 2014).

3. Materiais e Métodos

Os dados base utilizados para a classificação foram as variáveis altimetria e declividade disponíveis no banco de dados geomorfométricos Topodata

(BRASIL, 2008). Utilizou-se o Topodata (<http://www.dsr.inpe.br/topodata/>) como fonte de dados topográficos em detrimento do SRTM de 30 metros em razão da facilidade de obtenção dos dados. De modo a reduzir o tamanho dos dados para o processamento, bem como realizar um pré-processo de regionalização, essas variáveis geomorfológicas foram subamostradas para uma resolução espacial de 3 arco-segundos (aproximadamente 90m).

Como referência para a avaliação da metodologia proposta, foi utilizada a folha SG22 do mapeamento geomorfológico do RADAMBRASIL em escala 1:250.000, disponibilizado em formato vetorial pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Para verificações extras utilizou-se também o Mapeamento Geológico em escala 1:1.000.000

disponível no GEOBANK da CPRM (CPRM, 2004).

A escala de mapeamento deste trabalho foi de 1:1.000.000, sendo compatível ao táxon dos domínios morfoestruturais. Por esta razão, buscou-se o reconhecimento de três principais padrões de relevo: Planícies, Terrenos Cristalinos e Terrenos de Coberturas Sedimentares Fanerozóicas, os quais estão associados respectivamente aos domínios de DQS, CN e BCSF mapeados pelo RADAMBRASIL. Para a classificação foram testados o uso de diferentes derivações topográficas, técnicas e parâmetros, sendo relatados neste trabalho os procedimentos que obtiveram os resultados mais aderentes às características dos domínios morfoestruturais existentes na bacia. A Figura 2 apresenta o fluxograma com os principais procedimentos adotados para classificação.

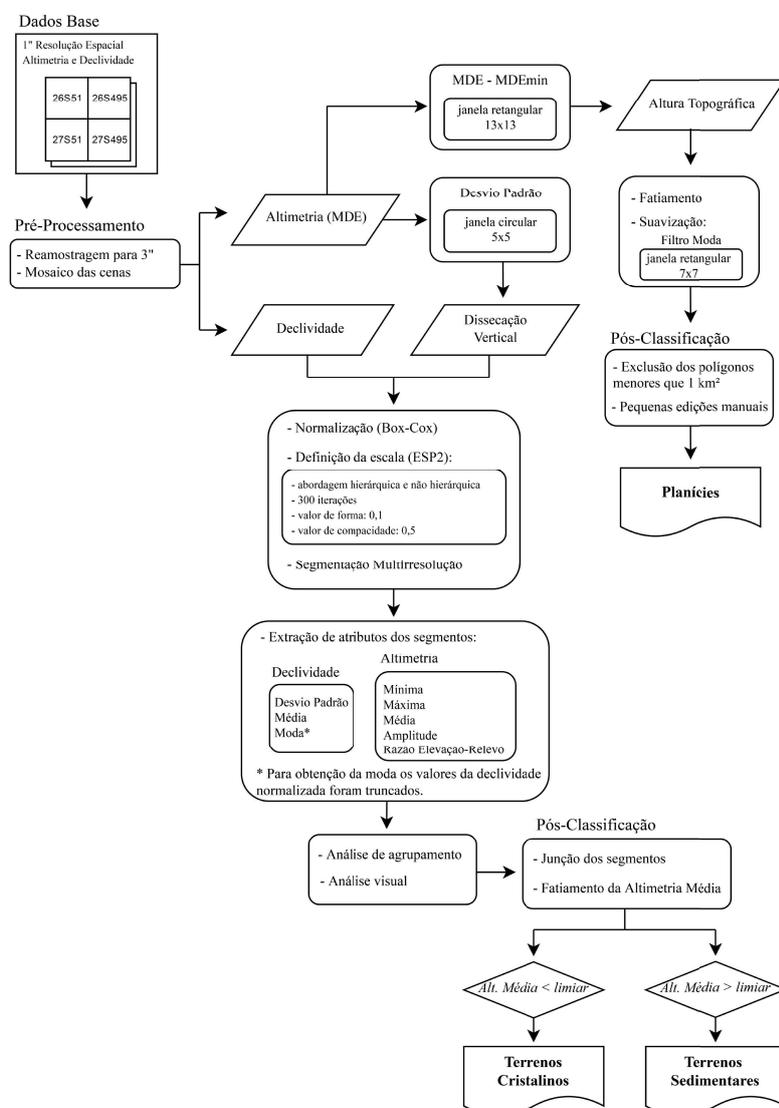


Figura 2 - Fluxograma das etapas metodológicas para classificação dos padrões de relevo compatíveis ao nível de domínio morfoestrutural.

Para a classificação das planícies, a altura topográfica se mostrou como a variável geomorfológica de melhor desempenho, confirmando o trabalho de Muñoz (2014) realizado na mesma área de estudo. A altura resulta da diferença entre a altimetria do MDE original e as altitudes mínimas presentes em um determinado raio de busca (e.g. janelas móveis). Dado que se tem o MDE como minuendo desta subtração, a altura apresenta variação local. Porém, 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. Foram testados diferentes raios de busca (definidos pelo tamanho de janelas móveis) para o estabelecimento das altitudes mínimas, adotando-se por fim um raio de aproximadamente 1,2km (janela de 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 aos talwegues e a outros pontos de altitude mínima local também apresentaram alturas abaixo de 13m sem constituírem planícies, mas a exclusão dessas áreas pelo critério de contiguidade foi realizada com a aplicação de filtro moda (7x7).

A classificação dos terrenos de coberturas sedimentares fanerozóicas e terrenos cristalinos foi realizada concomitantemente e à parte das áreas de planície. Nesta etapa, utilizou-se a abordagem de classificação por objetos (Dragut e Eisank, 2011). Após diversos testes iniciais de segmentação utilizando diferentes variáveis, optou-se por utilizar a metodologia sugerida por Bandura et al. (2015). Neste sentido, foram utilizadas como base nesta etapa do trabalho: 1) declividade (em graus) e; 2) desvio padrão da altimetria num raio de busca de aproximadamente 450m (com janela móvel de tamanho 5x5). Esta última variável é chamada pelos autores de dissecação vertical e expressa a amplitude da ondulação do terreno.

Em etapa anterior à segmentação, ambas as variáveis passaram por uma transformação numérica a fim de aproximar os valores a uma distribuição normal (Gaussiana), conforme sugerido por Eisank et al. (2014). Esta operação foi realizada por meio da ferramenta *Transformation (normalization) tool*, desenvolvida por Csillik et al. (2015). Pelo fato da dissecação vertical possuir distribuição assimétrica muito semelhante à declividade, a transformação de 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: *escala*, forma e compacidade. Dentre eles, destaca-se a importância da *escala* pelo fato de controlar a dimensão dos segmentos a serem produzidos. Para definição do valor de escala, utilizou-se a ferramenta *Estimation of scale parameter 2 - ESP2* (Dragut et al., 2014). Nela, manteve-se o mesmo peso para a declividade e dissecação vertical normalizadas e os parâmetros de forma e compacidade foram mantidos na configuração *default* do programa, 0.1 e 0.5, respectivamente.

Os segmentos obtidos com o valor de escala mais satisfatório foram utilizados como unidade de mapeamento para o cálculo dos seguintes atributos: altimetria mínima, altimetria máxima, média altimétrica, amplitude altimétrica, razão elevação-relevo (PIKE e WILSON, 1971), média da declividade, desvio padrão da declividade e moda de intervalos de declividade. 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 uma classificação não-supervisionada, por análise de agrupamento de cada variável individualmente. Os grupos foram gerados pelo método 'ward.D' da função 'hclust' presente no pacote 'Stats' do software R (<https://www.r-project.org/>). Para melhor observar a disposição espacial e a variação entre os atributos, optou-se por gerar 05 grupos por atributo, considerando a possibilidade de posteriores reagrupamentos. Os agrupamentos foram avaliados visualmente e com isto definiu-se o atributo com maior aderência ao mapeamento geomorfológico de referência. As áreas de planícies, classificadas anteriormente e de forma isolada, foram excluídas desta análise.

Escolhido o atributo, os segmentos que possuíam contiguidade espacial e que pertenciam ao mesmo grupo foram reagrupados, formando então "super-segmentos". A partir disso, foi observado que as altitudes médias dos super-segmentos se distribuíram acima ou abaixo de um determinado limiar, conforme pertencessem aos terrenos de coberturas sedimentares fanerozóicas ou aos terrenos cristalinos. Neste sentido, por meio de

um critério de fatiamento da altitude média dos super-segmentos, obteve-se a classificação final.

A classificação final foi avaliada por uma comparação mais direta ao mapeamento geomorfológico do RADAMBRASIL devido às semelhanças entre ambos. Para isso, foram realizados dois principais procedimentos: 1) Sobreposição e comparação visual e, 2) Tabulação cruzada entre a classificação e o mapeamento 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) Porcentual de detecção (Equação 1), 2) Porcentual de omissão (Equação 2) e, 3) Percentual de inclusão (Equação 3).

$$\text{Porcentagem de Detecção (PD)} = 100 \times \frac{VP}{VP+FN} \quad (1)$$

$$\text{Porcentagem de Erros de Omissão (EO)} = 100 - PD \quad (2)$$

$$\text{Porcentagem de Erros de Comissão (EC)} = 100 \times \frac{FP}{VP+FP} \quad (3)$$

4. Resultados e Discussão

O resultado da classificação das planícies pode ser visualizado na Figura 3. A representação do MDE em relevo sombreado (detalhes A e B) permite verificar o grau de ajuste entre os limites obtidos com os procedimentos adotados para delimitação de planícies e o padrão característico de planícies (plano), em contraste com a rugosidade do terreno em torno. 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.

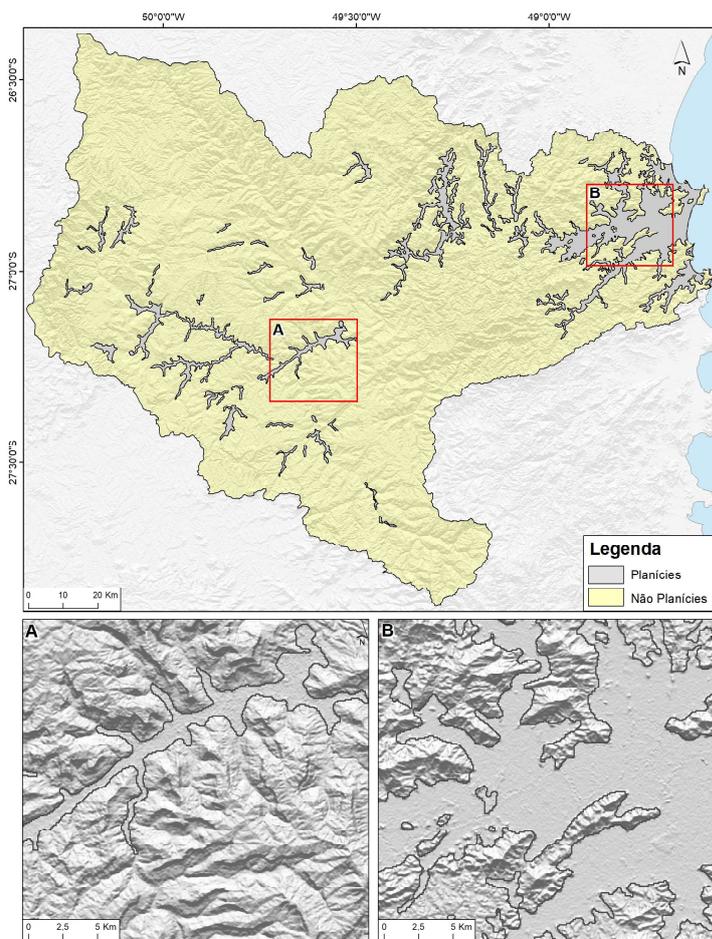


Figura 3 - Resultado da classificação dos terrenos correspondentes aos Depósitos Sedimentares Quaternários. Os quadros A e B mostram uma visualização mais detalhada da delimitação das planícies (contorno preto).

Ressalta-se que a escolha da altura topográfica se deve ao desempenho nos testes, explicado pela combinação de suas características numéricas e de variabilidade com as condições do relevo conforme representado no MDE, independentemente do grau de similaridade conceitual. No caso da declividade, a variável mais 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. Em condição distinta deste trabalho, espera-se também que o desenho de pequenas planícies em escalas detalhadas requeira justamente esta sensibilidade para se obter maior detalhe planimétrico e descritivo.

Por outro lado, pequenas feições também se mostram nos dados de altura e amplitude, mas as variações internas às planícies não atingem os níveis circunvizinhos, como as demais derivadas testadas. Testes com um grupo de descritores geomorfológicos 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) 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. E, 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 13m como base eficaz para o mapeamento das planícies desta bacia com dados derivados da SRTM, é possível que outras condições

(de MDE e de relevo) requeiram outras soluções para o melhor desempenho.

Ainda em relação à Figura 3, percebe-se que as feições mapeadas possuem diferentes tamanhos. As planícies próximas ao litoral, constituídas por sedimentos marinhos e fluviais são as mais extensas. Já as situadas no interior da bacia, constituídas por sedimentos alúvio-coluvionares, possuem menores extensões e largura, uma vez que se situam muito próximas a encostas que ainda não passaram por grandes processos de erosão. As feições interioranas de menores dimensões localizam-se nas sub-bacias do rio Itajaí do Norte e Itajaí do Sul, locais cuja geologia condicionou a existência de terrenos mais encaixados e por consequência a existência planícies menos extensas.

Os resultados da segunda etapa do trabalho se referem aos obtidos com os procedimentos adotados para delimitação dos outros dois grandes compartimentos geomorfológicos existentes na área de estudo. A Figura 4 mostra as distribuições da declividade e dissecação vertical em seus dados originais e normalizados. Percebe-se que tanto a dissecação vertical quanto a declividade possuíam distribuições com padrão assimétrico (*skewness*) na forma original. De acordo com os resultados derivados da transformação Box-Cox, para ambas as variáveis, a função raiz quadrada foi a mais adequada para a normalização das distribuições.

Na Figura 5 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.

A declividade e a dissecação vertical se mostraram correlacionadas ($r=0.79$), o que se pode esperar a partir da semelhança visual entre ambas. 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 obtidos com seu uso combinado (Figura 6) foram superiores. De acordo com observações de Valeriano e Rossetti (2017), as variações não correlacionadas estão associadas a características e feições de maior detalhe do que aquelas evidenciadas em escalas mais gerais, favorecendo a distinção de compartimentos subordinados às classes principais.

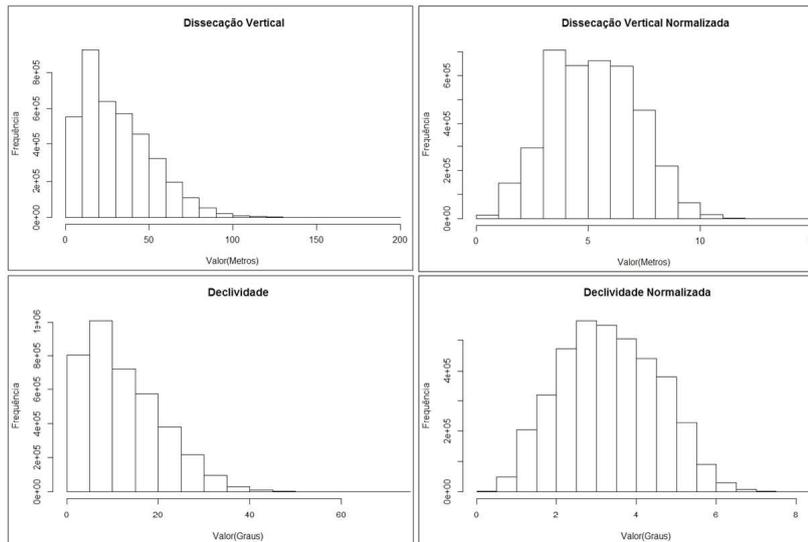


Figura 4 - Frequências da dissecação vertical e declividade, antes a após serem normalizadas.

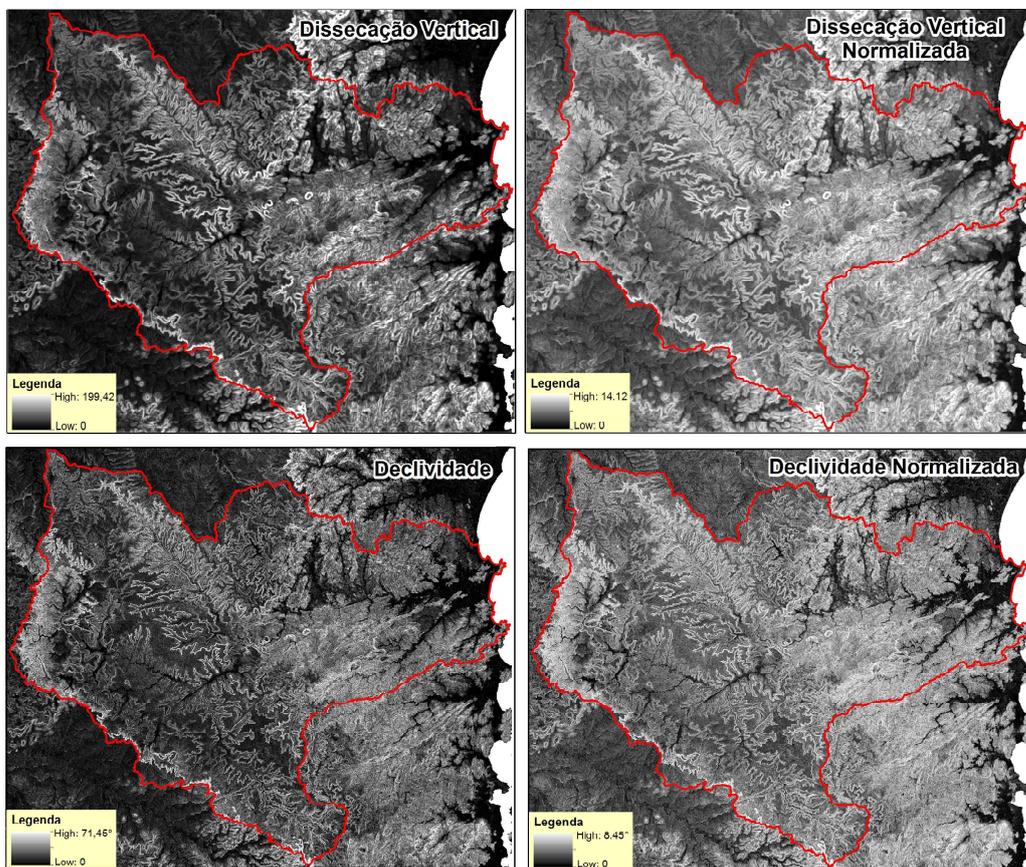


Figura 5 - Distribuição espacial dos valores de declividade e dissecação vertical, antes e após serem normalizadas.

Os valores de escala gerados pela ferramenta ESP2 foram: 353, 153 e 63. Após avaliação visual, optou-se por utilizar os segmentos gerados com a escala de 63. A Figura 6 apresenta o resultado final da segmentação. Conforme pode ser observado, os

segmentos individualizaram feições com diferentes padrões de relevo, assegurando a obtenção de objetos com significados geomorfológicos, conforme preceito indicado por Dragut e Blaschke (2006). Percebe-se ainda que algumas unidades de mapeamento, tais

como as expostas nos quadros de detalhe, englobaram pequenas planícies, divisores d'água e escarpas, o que era esperado e desejado para uma escala regional.

Ao observar os quadros de detalhes da Figura 6, é possível perceber que as unidades de mapeamento foram estabelecidas com tamanhos variados e representam, em diferentes níveis, relevos com características morfológicas distintas. No quadro A é possível notar que as unidades de mapeamento englobaram em diferentes unidades terrenos escarpados e os situados em planalto, bem como os terrenos mais baixos onde ocorrem morros testemunhos. No quadro B, é possível perceber que as feições relacionadas às escarpas da Serra da Geral também foram isoladas do contexto que possui formas mais suavizadas. O quadro C contém dois

segmentos adjacentes que delimitam os terrenos mais rugosos, situados a leste, dos mais suaves, situados a oeste. Esta diferenciação da textura do terreno é típica das áreas de contato entre os terrenos sedimentares fanerozóicos da bacia dos terrenos cristalinos, que possuem uma rede de drenagem mais densa em razão da menor infiltração d'água no manto de alteração, gerando assim maiores sulcos no terreno e por isso uma maior rugosidade.

Os resultados posteriores se referem àqueles obtidos com a análise de agrupamento dos dados geomorfológicos regionais (ou regionalizados) em cada segmento. Foram obtidos 08 diferentes mapas (Figura 7), de acordo com a variável utilizada como entrada para o agrupamento.

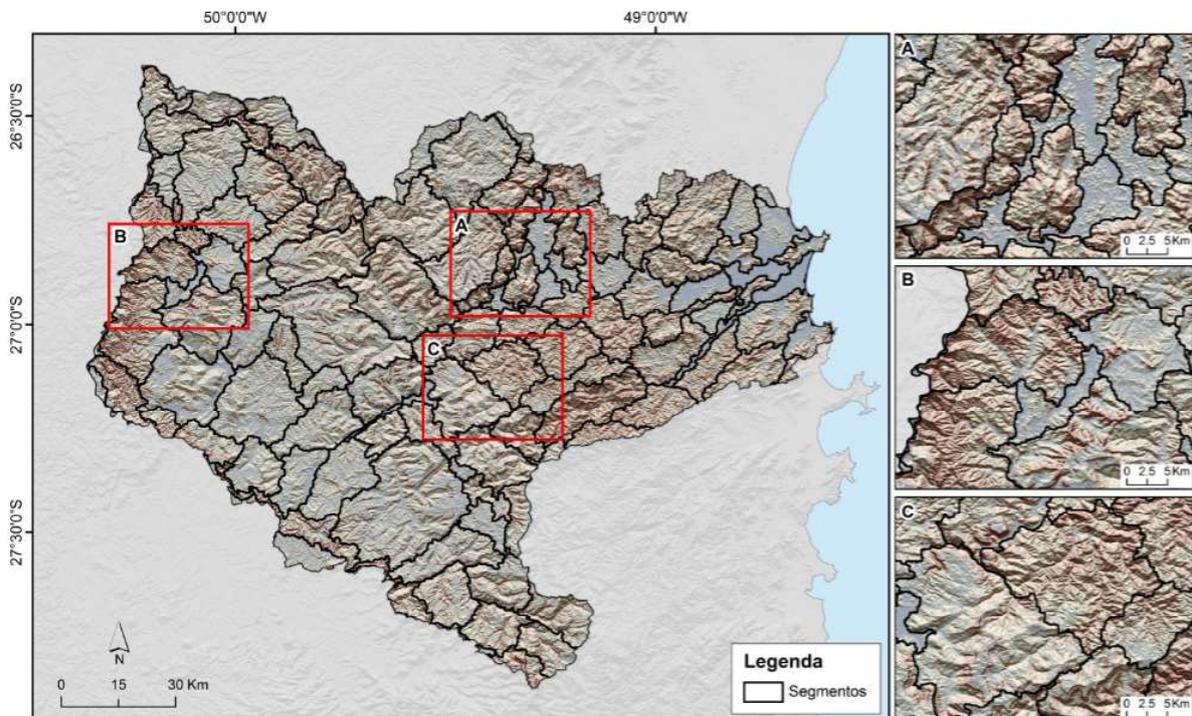


Figura 6 - Resultado da segmentação, utilizando a declividade e dissecação vertical como planos de informação de entrada.

Os agrupamentos gerados pela altimetria máxima, amplitude altimétrica, média altimétrica, razão elevação-relevo, média da declividade e desvio padrão da declividade geraram uma maior variabilidade espacial entre os grupos e não obtiveram relação significativa com a delimitação dos domínios morfoestruturais presentes nos mapeamentos 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 com os mapeamentos existentes e com os padrões de textura relativos aos dois compartimentos, quando visualizados em detalhe. No entanto, o resultado bruto do agrupamento 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 um procedimento de pós-classificação embasado no conhecimento da variação hipsométrica

existente entre os domínios morfoestruturais da bacia. A Figura 8 mostra o histograma da altimetria média dos segmentos unidos por contiguidade espacial em sobreposição ao histograma da elevação local.

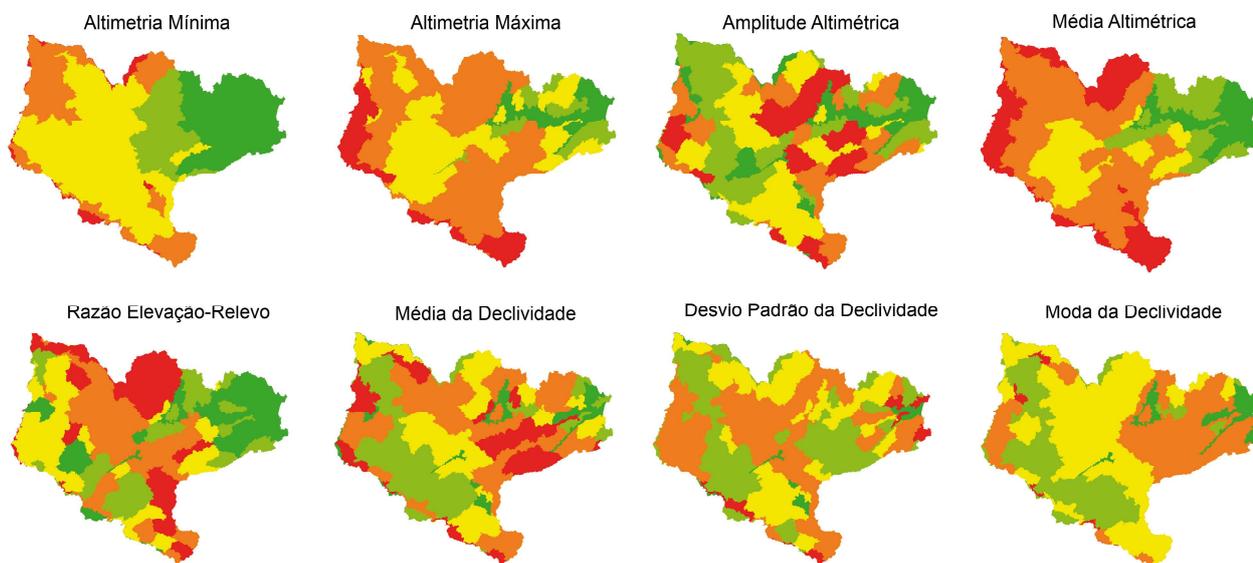


Figura 7 - Resultado da análise de agrupamento para cada variável utilizando o método hierárquico para constituição de 5 grupos.

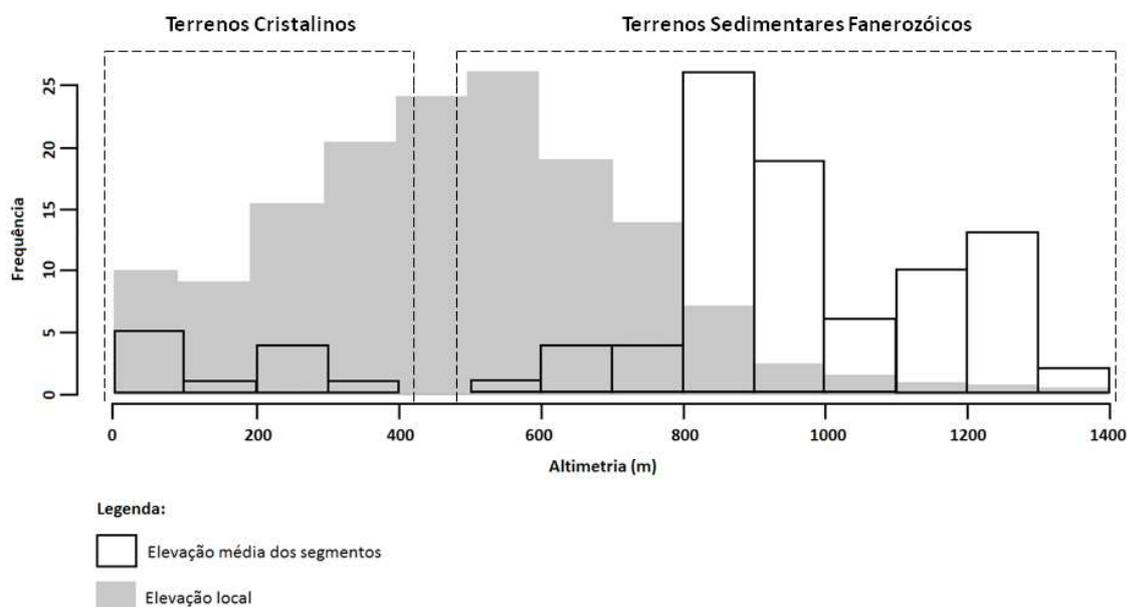


Figura 8 - Histograma da diferença altimétrica entre os grupos unidos por contiguidade espacial sobreposto ao histograma da distribuição da elevação local (pixel a pixel).

Na Figura 8, ao observar a distribuição da média de elevação dos segmentos, é possível notar a existência de dois padrões distintos: o primeiro variando de 0 a 400m e o segundo variando de 500m a 1.400m. Isso 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. Já os valores locais de elevação apresentam grande variação dentro das unidades de mapeamento,

portanto incluem a elevação de singularidades (altas ou baixas). Isto causa 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 existentes. Observando ambas as distribuições é possível notar que a elevação em sua forma local não possibilitaria tal distinção,

enquanto que as médias puderam evidenciar a distinção entre os dois domínios.

A Figura 9-A apresenta o mapeamento geomorfológico do RADAMBRASIL e a Figura 9-B apresenta o resultado da classificação final. Observando os dois mapas é possível notar a semelhança visual entre a classificação proposta e a originada pelo projeto RADAMBRASIL.

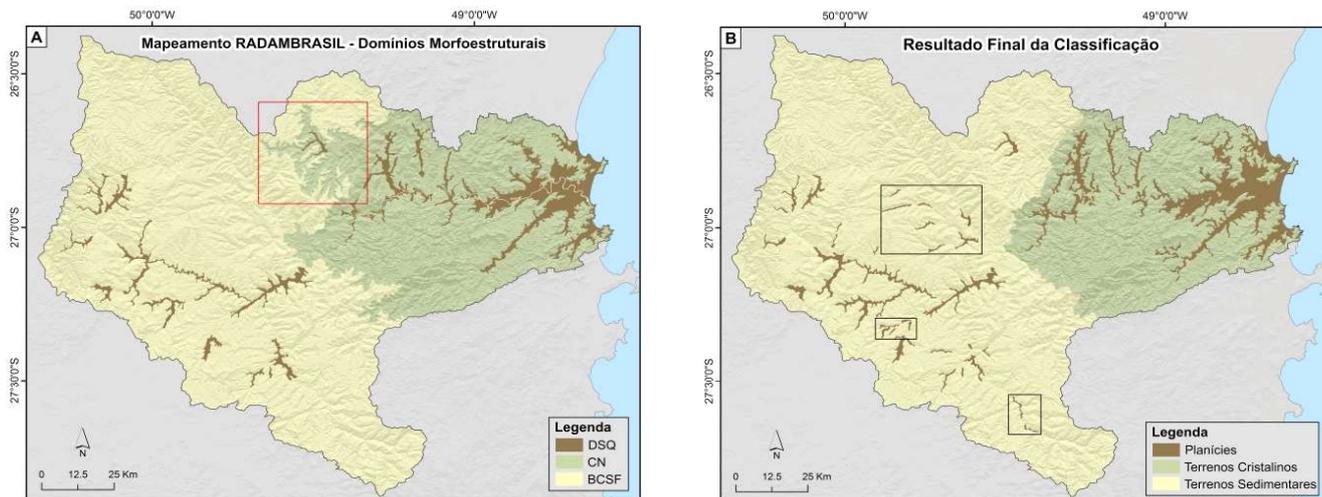


Figura 9 - Comparação entre as classes geomorfológicas existentes no mapeamento do RADAMBRASIL ('A') e as obtidas pela metodologia deste trabalho ('B').

Conforme destacado pelos quadros da Figura 9-A, 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 mapeamento dos Crátons Neoproterozóicos do RADAMBRASIL, destacada pelo quadro A da Figura 9-B, é a que possui a maior disparidade com resultados obtidos

neste trabalho. A figura 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.

Na figura 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-se as diferenças devido às escalas distintas, percebe-se que o limite gerado pela classificação proposta neste trabalho se assemelha mais com a delimitação do mapeamento geológico.

Os resultados obtidos com a avaliação quantitativa entre o mapeamento geomorfológico do RADAMBRASIL e a classificação proposta estão apresentados na tabela 01.

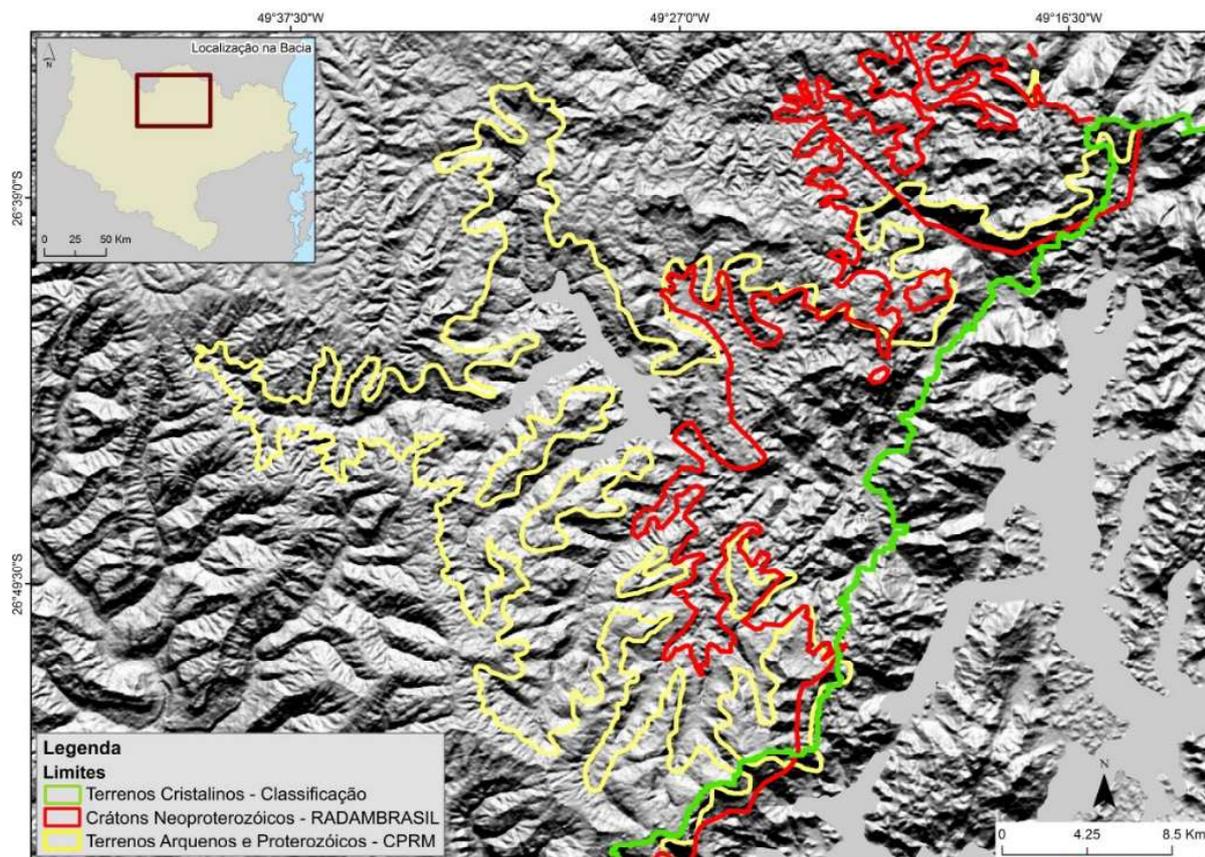


Figura 10 - Comparação entre as delimitações geradas pelo mapeamento do RADAMBRASIL, o mapeamento geológico da CPRM e pela classificação proposta.

Tabela 1: Avaliação quantitativa entre o mapeamento 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
Total de área classificada (km ²)	1.120,20	4.080,07	10.125,80
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

A partir da tabulação cruzada percebe-se que a classe referente às planícies foi a que apresentou os maiores erros de comissão, correspondendo a 28,4% da área mapeada. A classe referente aos terrenos cristalinos é a que possui a maior porcentagem de erros de omissão, 15,4%. Este valor possivelmente se relaciona com a diferença entre os traçados do mapeamento 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 inclui 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.

Considerações Finais

Este trabalho teve como objetivo apresentar uma proposta metodológica para classificação de compartimentos morfoestruturais por meio da caracterização geomorfométrica regional. Para as três classes mapeadas, foram obtidos índices de acerto superiores a 80%, sugerindo resultados coerentes e similares ao mapeamento oficial realizado manualmente.

Em vista das características da área de estudo, escala de mapeamento e resolução dos dados utilizados, a altura topográfica calculada num raio de aproximadamente 1,2km foi a variável considerada mais satisfatória para o mapeamento das planícies. O método de identificação usado neste estudo permitiu acrescentar áreas de planície não reconhecidas como tal no mapeamento oficial. 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 geração de unidades de mapeamento relativas aos terrenos cristalinos e sedimentares fanerozóicos, foi possível notar que a utilização de variáveis geomorfométricas normalizadas gerou polígonos maiores e mais homogêneos do que os gerados com as mesmas em suas distribuições originais. 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 táxon de domínio morfoestrutural.

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 desta análise, 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.

Em relação aos métodos tradicionais de mapeamento, a abordagem apresentada se mostra como uma boa alternativa, 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 métodos de análise.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos revisores anônimos que contribuíram para a qualidade do artigo com seus comentários e sugestões. Os autores são também gratos ao CNPq pela bolsa de mestrado de Jéssica Gerente e de pesquisa de Márcio de Morisson Valeriano (processo nº 307472/2014-0) e à CAPES pela bolsa de doutorado de Eder Paulo Moreira.

Referências Bibliográficas

BANDURA, P.; MINÁR, J.; HARCINÍKOVÁ, T.; DRĀGUŤ, L. **Towards delineation of the morphostructural division of the Western Carpathians using object-based image analysis.** In: Geomorphometry for Geosciences, Jasiewicz, J.; Zwoliński, Z.; Mitasova, H.; Hengl, T. (eds), 2015. Adam Mickiewicz University in Poznań - Institute of Geoecology and Geoinformation, International Society for Geomorphometry, Poznań.

BRASIL, 2008. **Topodata: banco de dados geomorfométricos do Brasil.** INPE, São José dos Campos, Brasil <<http://www.dsr.inpe.br/topodata>>.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS

- (CPRM-Servicio Geológico do Brasil). **Geobank**. Carta geológica do Brasil ao milionésimo: folha SG22, Curitiba. Brasília DF, 2004. Geologia geral e geologia estrutural. 2 Mapas. Escala 1:1.000.000. Disponível em: <<http://geobank.sa.cprm.gov.br/>>.
- CSILLIK, O., EVANS, I. S., DRĂGUȚ, L., 2015. Transformation (normalization) of slope gradient and surface curvatures, automated for statistical analyses from DEMs. **Geomorphology**, 232, 65–77.
- DENT, D.; YOUNG, A. 1981. **Soil survey and land evaluation**. London, Allen and Unwin. 278 pp
- DRĂGUȚ, L., CSILLIK, O.; EISANK, C.; TIEDE, D., 2014. Automated parameterisation for multi-scale image segmentation on multiple layers. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, 88: 119-127.
- DRĂGUȚ, L., EISANK, C., 2011. Object representations at multiple scales from digital elevation models. **Geomorphology**, 129 (3–4), 183–189.
- DRĂGUȚ, L.; BLASCHKE, T., 2006. Automated classification of landform elements using object-based image analysis. **Geomorphology**, v. 81, n. 3-4, p.330-344.
- EISANK, C., SMITH, M., HILLIER, J., 2014. Assessment of multiresolution segmentation for delimiting drumlins in digital elevation models. **Geomorphology**, 214: 452 – 464.
- HENGL, T. Finding the right pixel size. **Computers and Geosciences**, v.32, 1283-1298, 2006.
- LUIZ, E. L.. Geomorfologia. In: Santa Catarina. Secretaria de Estado do Planejamento. Diretoria de Estatística e Cartografia; Isa de Oliveira Rocha. (Org.). **Atlas Geográfico de Santa Catarina: Diversidade da Natureza**. Fascículo 2. 1ed. Florianópolis: Editora da UDESC, 2014, p. 91-108.
- MINAR, J., EVANS, I.S., 2008. Elementary forms for land surface segmentation: the theoretical basis of terrain analysis and geomorphological mapping. **Geomorphology** 95, p 236–259
- MOORE, I. D., LEWIS, A., GALLANT, J. C., 1993. Terrain attributes: estimation methods and scale effects. In: **Modelling change in environmental systems**. Jakeman, A. J.; Beck, M. B.; McAleer, M. J. John Wiley e Sons Ltd. (Ed.), Chichester (Eng.). 584p. Capítulo 8, p.189-214.
- 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, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, São José dos Campos, 2014.
- 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.
- SANTA CATARINA. Gabinete de Planejamento e Coordenação Geral. **Atlas de Santa Catarina**. Florianópolis: GAPLAN, 1986.
- 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.