



www.ugb.org.br
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 14, n° 4 (2013)



RELAÇÕES ENTRE DADOS SRTM E CLASSES GEOMORFOLÓGICAS DO PROJETO RADAMBRASIL

RELATIONSHIPS BETWEEN SRTM DATA AND GEOMORPHOLOGICAL CLASSES FROM RADAMBRASIL PROJECT

Pedro José Farias Fernandes

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – Divisão de Sensoriamento Remoto – DSR/INPE – Caixa Postal 515 -
CEP: 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil – Laboratório de Geografia Física – Universidade Federal
Fluminense - LAGEF/UFF – Av. Gal. Milton Tavares de Souza s/n° - CEP: 24210-346 - Niterói - RJ, Brasil
E-mail: pjff@dsr.inpe.br

Márcio de Morisson Valeriano

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – Divisão de Sensoriamento Remoto – DSR/INPE – Caixa Postal 515 -
CEP: 12227-010 – São José dos Campos/SP, Brasil
E-mail: valerian@dsr.inpe.br

Informações sobre o Artigo

Data de Recebimento:
07/08/2013

Data de Aprovação:
06/11/2013

Palavras-chave:

Variáveis geomorfométricas;
SRTM, RADAMBRASIL.

Keywords:

Geomorphometric parameters;
SRTM, RADAMBRASIL.

Resumo

O objetivo do presente trabalho é mostrar a relação entre dados geomorfométricos SRTM com as classes geomorfológicas mapeadas pelo projeto RADAMBRASIL até o terceiro nível taxonômico. Especificamente, busca-se caracterizar por meio de análise visual e estatística descritiva as classes apresentadas em torno da geomorfometria extraída dos dados SRTM, e indicar, a partir das análises feitas, as VG diferenciadoras dessas classes. Os dados SRTM provenientes do projeto TOPODATA foram preparados e tratados em ambiente SIG, o que permitiu a análise visual e quantitativa das classes RADAMBRASIL, e a indicação de variáveis geomorfométricas separadoras de classes para uma área de estudo localizada no Estado do Rio de Janeiro, no entorno da Baía de Guanabara. A análise quantitativa foi feita com base em estatísticas descritivas extraídas no SIG, e em histogramas e gráficos *boxplots*. Os dados SRTM permitiram, no geral, a caracterização geomorfométrica regional, tanto visual quanto quantitativa, de classes de relevo RADAMBRASIL para cada nível taxonômico. As classes que mais se diferenciaram por uma maior quantidade de VG foram as classes do primeiro nível taxonômico, em que a altimetria, declividade e curvatura vertical mostraram potencial na separação dos Domínios Morfoestruturais. Nos demais táxons, menos variáveis geomorfométricas foram indicadas, e houve maior grau de confusão entre classes. As análises empregadas serviram para recuperar um modelo de conhecimento implícito no mapa RADAMBRASIL a partir das variáveis geomorfométricas, que permitiram o entendimento do comportamento geomorfométrico das classes, e assim, fazer algumas relações com seus processos formadores.

Abstract

The aim of this work is to show the relationship between geomorphometric SRTM data with geomorphological classes mapped by the project RADAMBRASIL until the third taxonomic level. Specifically, visual and quantitative analysis were made to indicate the geomorphometric parameters for differentiation of RADAMBRASIL classes. The SRTM data from TOPODATA project were prepared and treated in a GIS environment, allowing visual and quantitative analysis from RADAMBRASIL classes, indicating geomorphometric parameters that separate classes for a study area located in the state of Rio de Janeiro. Quantitative analysis was based on descriptive statistics extracted from the GIS, and based on histograms and boxplots. The SRTM data allowed, in general, the regional geomorphometric characterization, both visual and quantitative, for each taxonomic level. The classes that most differed were the classes of the first taxonomic level, where altitude, slope, and vertical curvature showed potential in the separation of morphostructural domains. In other taxonomic levels, less geomorphometric parameters were indicated, and there was a greater degree of confusion between classes. The analysis employed served to recover a knowledge model from RADAMBRASIL, which allowed the understanding of the geomorphometric behavior from classes, and thus make some relationships between SRTM data and geomorphologic processes.

Introdução

Modelos Digitais de Elevação (MDE) são representações de valores de elevação da superfície terrestre na forma de uma matriz ou de uma malha triangular (*triangular irregular network*). No formato matricial, cada célula possui um par de coordenadas (x, y) e o valor z referente à elevação (HENGL; REUTER, 2009). Os MDE são um dos mais importantes dados nos trabalhos de análise geoespacial (TOUTIN, 2004). Os MDE do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) são dados de cobertura global, que quando tratados em SIG, servem como auxílio ao mapeamento geomorfológico, e permitem a caracterização geomorfométrica das classes mapeadas, uma vez que, apesar de suas limitações (VALERIANO et al., 2006), são dados de grande qualidade (RABUS et al., 2003; RODRÍGUEZ et al., 2006).

Por outro lado, antigos mapeamentos de recursos naturais envolveram técnicas de fotointerpretação que não contavam com as ferramentas computacionais disponíveis, bem como bases de dados atuais, o que não permitia uma caracterização geomorfométrica em bases quantitativas (BARBOSA, 1973). O fotointérprete delineava os polígonos dos mapas a partir de seu conhecimento, e estabelecia uma análise entre as classes mapeadas e as condições ambientais da paisagem, conforme sua percepção a partir dos dados disponíveis. Por isso, tais mapas possuem, implicitamente, conhecimento especializado dos fotointérpretes (QI; ZHU, 2003). No Brasil, a utilização do mapa geomorfológico do projeto RADAMBRASIL deve ser vista neste contexto, dada a caracterização dos recursos naturais em diversos temas, mas que dificilmente será repetido. Apesar da escala generalizada (1:1.000.000), consiste, muitas vezes, na única fonte de dados.

Alguns estudos mostram a relação dos dados geomorfométricos com classes mapeadas, identificando as VG com significado para determinado tipo de mapeamento. Por exemplo, Muñoz (2009) identifica as VG derivadas de dados SRTM para o mapeamento de solos em São Carlos (SP). Qi e Zhu (2003) propõe uma metodologia para a recuperação de um modelo de conhecimento em mapas de solo a partir de uma base de dados geográficos na qual as VG estão incluídas. Bispo et al. (2009) avaliam o potencial das VG SRTM para identificar classes de vegetação na Amazônia. Para o caso específico da Geomorfologia, os trabalhos utilizam VG com o objetivo de desenvolver

metodologias para automatizar o mapeamento geomorfológico (DRAGUT; EISANK, 2012; ANDERS et al., 2011; CAMARGO et al., 2011; DRAGUT; BLASCHKE, 2006).

Portanto, o objetivo do presente trabalho é mostrar a relação entre dados geomorfométricos SRTM com as classes geomorfológicas mapeadas pelo projeto RADAMBRASIL até o terceiro nível taxonômico. Especificamente, busca-se caracterizar por meio de análise visual e estatística descritiva as classes apresentadas em torno da geomorfometria extraída dos dados SRTM, e indicar, a partir das análises feitas, as VG diferenciadoras dessas classes.

Área de Estudo

A área de estudo (Figura 1) está localizada nas Folhas SF.23/24 Rio de Janeiro/Vitória do Projeto RADAMBRASIL, no Estado do Rio de Janeiro, entre, aproximadamente, as latitudes -22° S e -23° S, e longitudes -43° W e -44° W. A área foi selecionada pela sua variedade topográfica e abriga seis Unidades Geomorfológicas, três Regiões Geomorfológicas e dois Domínios Morfoestruturais, como indica a hierarquia das classes na Figura 2.

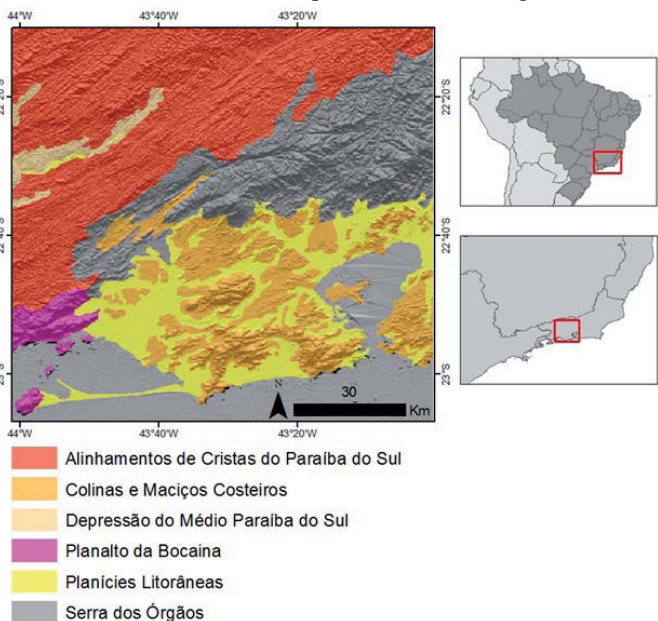


Figura 1 – Localização da área de estudo.

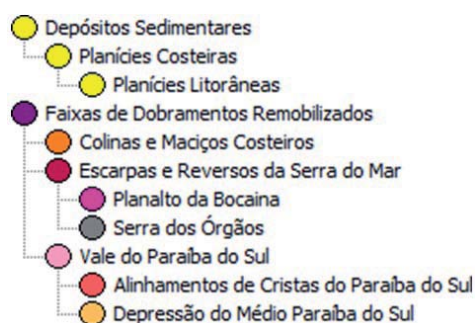


Figura 2 – Hierarquia das classes presentes na área de estudo.

A Geomorfologia da área é sustentada, em sua maior parte, por rochas pré-cambrianas. As principais unidades geológicas compreendem gnaisses, granitos e migmatitos que foram deformados durante o Ciclo Brasileiro no Neoproterozóico (SILVA, 2002). O Estado do Rio de Janeiro fica situado na Província Mantiqueira, afetada pelas orogêneses neoproterozóicas do Brasileiro (CPRM, 2001). As orogêneses, que culminaram na Faixa Ribeira, foram resultado dos processos convergentes entre a placa africana e o Cráton de São Francisco. Por isso, o Ciclo Brasileiro foi caracterizado por metamorfismo, fusão parcial das rochas, deformações, cisalhamento transcorrente regional e granitogênese que originou corpos granitóides (CPRM, 2001).

As rochas mais antigas datam do Paleoproterozóico. A maioria das rochas data do Meso-Neoproterozóico e do Neoproterozóico. As orogêneses supracitadas do Ciclo Brasileiro foram acompanhadas pela granitogênese associada a processos de deformação e metamorfismo, que originaram corpos granitóides (pré a pós-colisionais), que deram origem a Serra dos Órgãos e a alguns maciços costeiros.

Durante o Meso-Cenozóico houve um magmatismo alcalino relacionado à Reativação Wealdeniana que deu origem, provavelmente, a partir de uma única câmara magmática, a plútons alinhados em decorrência de uma falha (CPRM, 2001). Esse evento deu origem aos maciços alcalinos, e está relacionado à evolução do Oceano Atlântico após a quebra do continente Pangea durante o Cretáceo (Mesozóico). As atividades tectônicas cenozóicas levaram a reativação de falhas e ao desenvolvimento de um sistema de riftes que deu origem aos Grábens da Guanabara e do Paraíba do Sul, onde se instalaram depósitos sedimentares terciários e quaternários.

Material e métodos

Dados e recursos de processamento

Foram utilizados dados SRTM refinados e suas VG provenientes do projeto Topodata (<http://www.dsr.inpe.br/topodata/>) no formato TIFF, folhas 22S45, 22S435, 23S45_ e 23S435, e com tamanho de *pixel* de 1 arco-segundo

(aproximadamente 30m): altimetria, declividade, curvatura horizontal, curvatura vertical, orientação de vertentes e relevo sombreado. Foi utilizado o mapa geomorfológico no formato vetorial para a área de estudo do Projeto RADAMBRASIL das Folhas SF.23/24 Rio de Janeiro/Vitória na escala 1:1.000.000 (RADAMBRASIL, 1983) para eventuais consultas e levantamento de dados.

Para realizar o trabalho, os seguintes *softwares* foram utilizados: ArcGIS 9.3 (ESRI, 2008) (utilizado na visualização de planos de informação (PI) e confecção de cartogramas); e Cognition 8.7 (utilizado na segmentação e seleção de amostras); ENVI 4.7 (ITT, 2009) (utilizado para as análises dos dados) e R 3.0.0 (utilizado na geração dos gráficos)

Métodos

O fluxograma (Figura 3) mostra as etapas do trabalho. Primeiro, foi feita a análise visual para comparar o mapa geomorfológico RADAMBRASIL com as VG SRTM, e, assim, identificar as relações entre os dados. Em uma segunda fase, foram feitas análises quantitativas para obter a estatística descritiva, histogramas por classes e gráficos *boxplot* a partir das VG, com exceção da orientação de vertentes, que por causa de sua natureza circular, não se pode calcular tais estatísticas com seus valores em graus, sob o risco de obtenção de resultados incorretos (VALERIANO, 2008). Cabe lembrar que as análises quantitativas foram feitas separadamente até o terceiro nível taxonômico do mapa RADAMBRASIL. Conforme menciona Ross (1992), o primeiro táxon refere-se aos Domínios Morfoestruturais, o segundo táxon é referente às Regiões Geomorfológicas, e o terceiro táxon é o das Unidades Geomorfológicas.

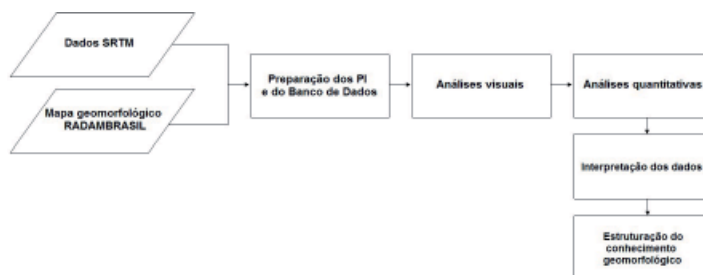


Figura 3 – Fluxograma de etapas do trabalho.

As VG foram organizadas em ambiente SIG, onde foram aplicados processamentos matemáticos que permitiram a obtenção dos PI de módulo da curvatura vertical, de módulo da curvatura horizontal e de declividade em graus. Os dados foram visualizados para fins de apreciação inicial e inseridos no *software* e Cognition 8.7. Então, objetos foram criados, a partir do uso do algoritmo de segmentação multiresolução sobre a declividade, para a obtenção de amostras de todas as classes por nível taxonômico, com exceção dos Alinhamentos

de Cristas do Paraíba do Sul e da Depressão do Médio Paraíba do Sul no terceiro táxon, em que a altimetria foi utilizada na segmentação para a criação dos objetos referentes a essas duas últimas classes.

A partir das segmentações, amostras para cada classe dos níveis taxonômicos foram coletadas em uma estratégia de amostragem aleatória estratificada, quando possível. Amostras de áreas duvidosas foram excluídas das análises a partir da interpretação do mapa original em conjunto com as VG e o relevo sombreado. Depois, as amostras selecionadas foram inseridas no ENVI 4.7, onde se extraíram as estatísticas descritivas, o que permitiu a caracterização geomorfométrica das classes por nível taxonômico. Finalmente, foram gerados histogramas e gráficos *boxplot* em ambiente R. Tais análises

permitiram a estruturação do conhecimento geomorfológico a partir dos dados SRTM.

Resultados

Análise visual

Altimetria

A altitude da área de estudo varia desde o nível do mar até aproximadamente 2200 m. Pela análise visual, é possível verificar que a altimetria permite a compartimentação do relevo nas Unidades Geomorfológicas do mapa RADAM-BRASIL (Figura 4).

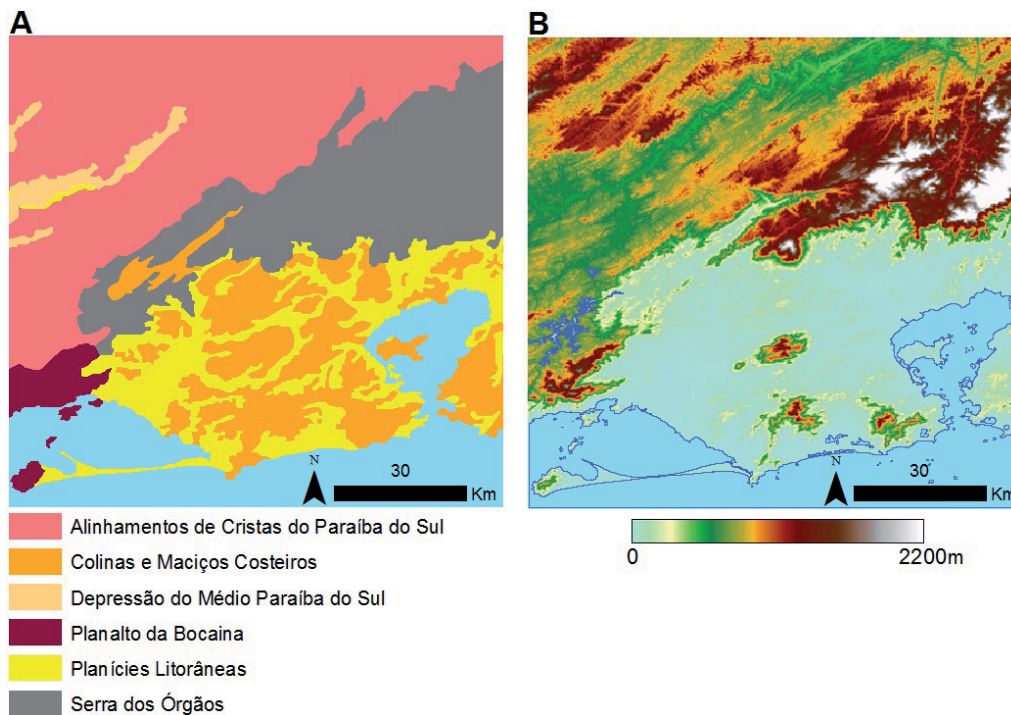


Figura 4 - Comparação entre as Unidades Geomorfológicas (A) e o MDE (B).

Os Depósitos Sedimentares ocupam, na maior parte, as menores altitudes, entre, aproximadamente, 0 e 30 m, e estão localizados próximo à linha de costa. Entretanto, há a ocorrência dos depósitos da planície do rio Paraíba do Sul, que podem ser considerados regionalmente relevantes. A planície do rio Paraíba do Sul está situada entre altitudes de 280 a 370 m, aproximadamente, e ocorre na direção SW-NE. Os valores de altitude mais baixos das Planícies Litorâneas em comparação às áreas vizinhas estão relacionados à existência dos grábens da Guanabara e do Paraíba, que são cobertos por sedimentos (ALMEIDA; CARNEIRO, 1998).

A classe Colinas e Maciços Costeiros é percebida por elevações superiores a 65 m, aproximadamente, e pode

atingir até 1000 m, como no Maciço da Pedra Branca. Por definição, as Colinas possuem valores de altitude menores que as dos Maciços, que, na sua maior parte apresentam altitudes maiores que 200m. Os valores mais altos dessa classe (correspondentes aos Maciços) podem ser explicados pela presença de um horst existente no litoral do Estado do Rio de Janeiro (RADAMBRASIL, 1983; ALMEIDA; CARNEIRO, 1998).

A Serra dos Órgãos abriga os valores mais altos de altitude para a área de estudo, podendo atingir até 2200 m, aproximadamente. Percebe-se, pela visualização do MDE, que as escarpas dessa classe exibem controle estrutural sobre a drenagem, onde seus vales são reflexos das falhas e fraturas

existentes, como o próprio memorial do RADAMBRASIL indica. O Planalto da Bocaina é o trecho da Serra do Mar que bordeja o Oceano Atlântico e pode atingir altitudes de até 1200 m, aproximadamente, para a área de estudo. Sua vertente voltada para o mar condiciona a ocorrência de rios que desaguam no litoral.

Os Alinhamentos de Cristas do Paraíba do Sul apresentam altitudes menores que as da Serra do Mar. Exibem colinas típicas do domínio dos mares de morros originadas pela mamelonização do relevo, por volta de 400 a 600 m, e alinhamentos serranos que podem atingir até 1200 m. Também, mostram falhas que evidenciam o tectonismo que ocorreu. A Depressão do Médio Paraíba do Sul ocupa uma área deprimida em relação aos Alinhamentos de Cristas vizi-

nhos (em torno de 350~400 m), devido ao gráben do Paraíba (ALMEIDA; CARNEIRO, 1998). No seu interior, ocorre a planície do rio Paraíba do Sul, condicionada por um forte domínio estrutural, principalmente no trecho retilíneo.

Declividade

Os valores de declividade da área de estudo variam de 0 a 80°. Percebe-se que há correspondência entre as manchas das classes RADAMBRASIL e o PI de declividade, uma vez que o segundo realça fronteiras entre os diferentes tipos de relevo (Figura 5), permite a compartimentação geomorfológica, e, inclusive, o delineamento de colinas suaves.

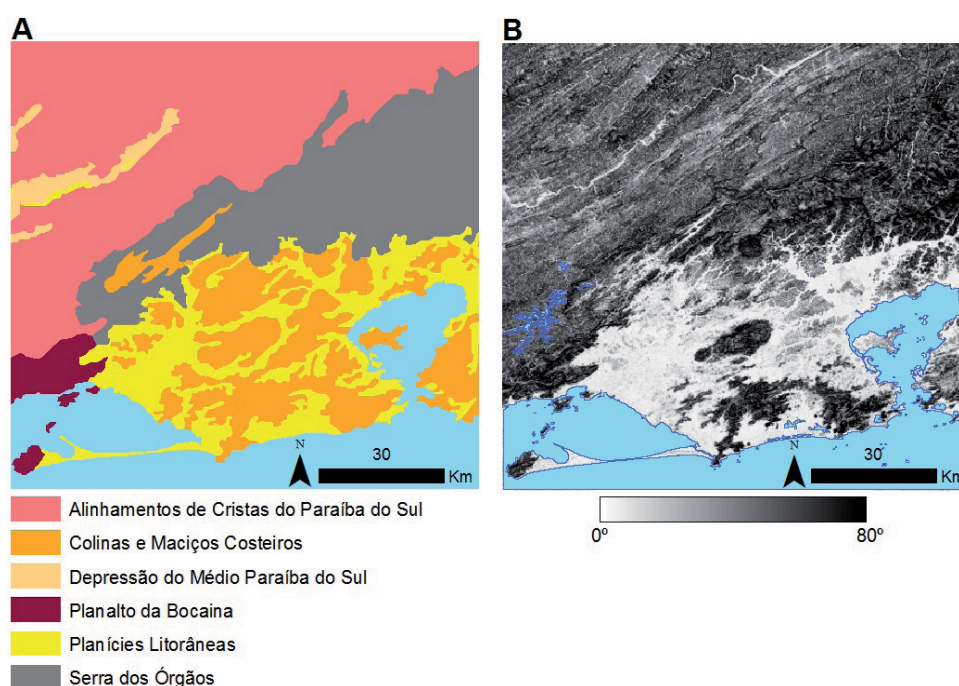


Figura 5 – Comparação entre as Unidades Geomorfológicas (A) e a declividade (B).

Curvaturas

A curvatura vertical também mostra relações visuais com as manchas das classes (Figura 6). Os valores variam de $-0,37^{\circ}/m$ até $0,45^{\circ}/m$, aproximadamente. Os Depósitos Sedimentares ocorrem em valores intermediários de curvatura vertical, ou seja, em áreas mais retilíneas, enquanto que as demais classes ocupam áreas mais dobradas, com valores extremos de concavidade e convexidade. É possível perceber um padrão de diferenciação entre as áreas mais escarpadas e de declividade alta (Planalto da Bocaina, Serra dos Órgãos e dos Maciços Costeiros) das demais (Alinhamentos de Cristas do Paraíba do Sul, Depressão do Médio Paraíba do Sul e os relevos colinosos). Visualmente, a Curvatura Horizontal

não se mostrou razoável para a diferenciação do traçado das classes.

Relevo sombreado e Orientação de vertentes

O relevo sombreado e a orientação das vertentes, por fornecerem uma noção da textura do terreno, permitem o delineamento das classes geomorfológicas. Portanto, é possível verificar relações entre esses dois PI e o mapa RADAMBRASIL (Figura 7). A textura varia desde lisa para os Depósitos Sedimentares até muito rugosa para as áreas de maior declividade. Entretanto, a orientação das vertentes mostra confusão nas áreas planas dos Depósitos Sedimentares, que apresentam um aspecto granuloso (VALERIANO, 2008).

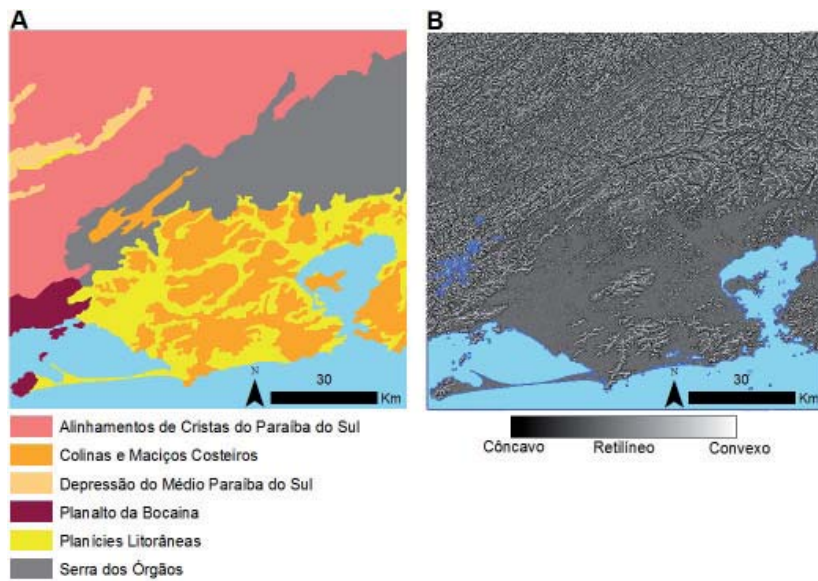


Figura 6 – Comparação entre as Unidades Geomorfológicas (A) e a curvatura vertical (B).

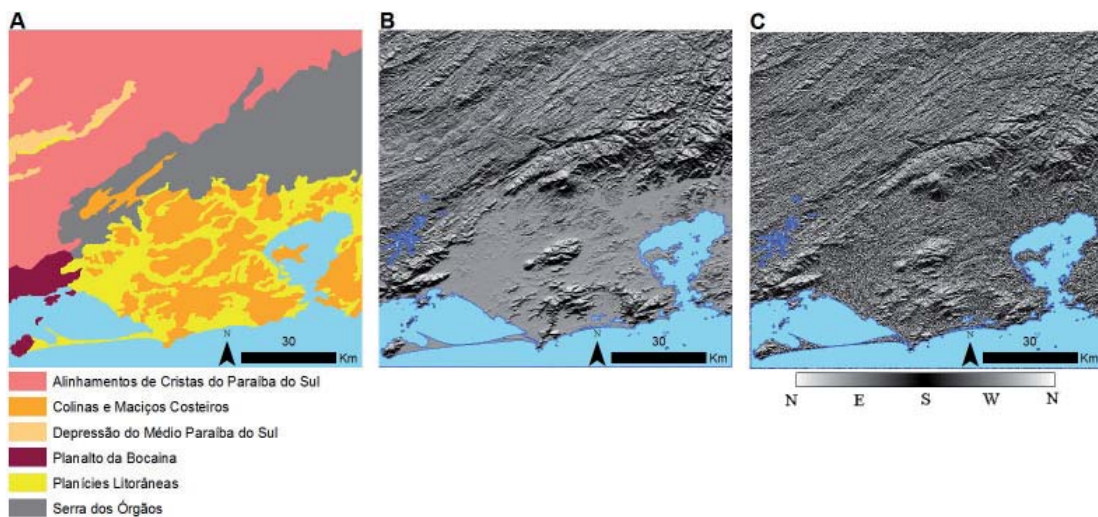


Figura 7 - Comparação entre as Unidades Geomorfológicas (A), Relevo Sombreado (B) e Orientação das Vertentes (C).

Análise quantitativa e caracterização

Primeiro táxon

A Tabela 1 mostra a caracterização geomorfométrica para as Faixas de Dobramentos Remobilizados (FDR) e para os Depósitos Sedimentares (DS). Os histogramas e os *boxplots* estão nas Figuras 8 e 9, respectivamente. Pelo exame dos dados, observou-se que as Faixas de Dobramentos Remobilizados possuem o maior pico de frequência em 26,89 m, e se distribuem ao longo de 3 grandes grupos de altitude (Figura 10). O primeiro, que vai até 100 m, engloba relevos de colinas suaves, o segundo, de 100 a 500 m, abriga relevos típicos dos mares de morros, e o terceiro, acima de 500 m, corresponde às escarpas, alinhamentos serranos e aos maciços costeiros.

Como os Depósitos Sedimentares (que possuem o maior pico de frequência, em torno de 2,799 m) em sua maior parte, estão em áreas de até 70 m aproximadamente, concentrando-se majoritariamente em relevos de até 30 m (com exceção da planície do Paraíba do Sul que está localizada, na sua maior parte, em uma faixa de 300 até 370 m), a altimetria não foi indicada na separação das altitudes de até 100 m das Faixas de Dobramentos Remobilizados e dos Depósitos Sedimentares. Entretanto, esta VG se mostrou eficiente na diferenciação de áreas com altitude maior que 100 m. Um limiar de altimetria para a definição das duas classes RADAMBRASIL do primeiro táxon nesta área de estudo seria o valor de 30 m (Figura 11), em que a maior parte dos Depósitos Sedimentares mapeados pelo RADAMBRASIL foi separada.

Tabela 1: Geomorfometria das classes do 1º táxon.

Variável	Classe	Mínimo	Máximo	Média	Desv. Pad.
Altimetria (m)	Depósitos Sedimentares	0	466,87	32,39	69,37
	Faixas de Dobr. Remob.	1,09	2194,47	501,83	321,73
Declividade (°)	Depósitos Sedimentares	0,02	30,16	2,04	1,68
	Faixas de Dobr. Remob.	0,23	73,30	18,24	8,56
Curv. Vertical (°/m)	Depósitos Sedimentares	-0,1706	0,1263	-0,0038	0,0120
	Faixas de Dobr. Remob.	-0,2641	0,3628	-0,0064	0,0556
Módulo da Curv. Vertical (°/m)	Depósitos Sedimentares	0	0,1706	0,0077	0,0101
	Faixas de Dobr. Remob.	0	0,3628	0,0443	0,0342
Curv. Horizontal (°/m)	Depósitos Sedimentares	-4,9825	4,9886	-0,1978	1,2235
	Faixas de Dobr. Remob.	4,9833	4,9907	-0,0003	0,8502
Módulo da Curv. Horizontal (°/m)	Depósitos Sedimentares	0	4,9886	0,9150	0,8360
	Faixas de Dobr. Remob.	0	4,9908	0,5363	0,6598

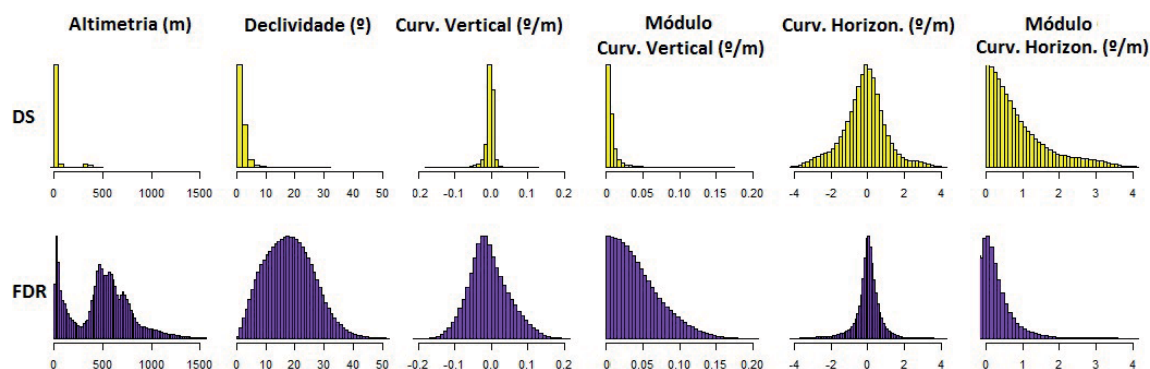


Figura 8 – Histogramas para o primeiro táxon.

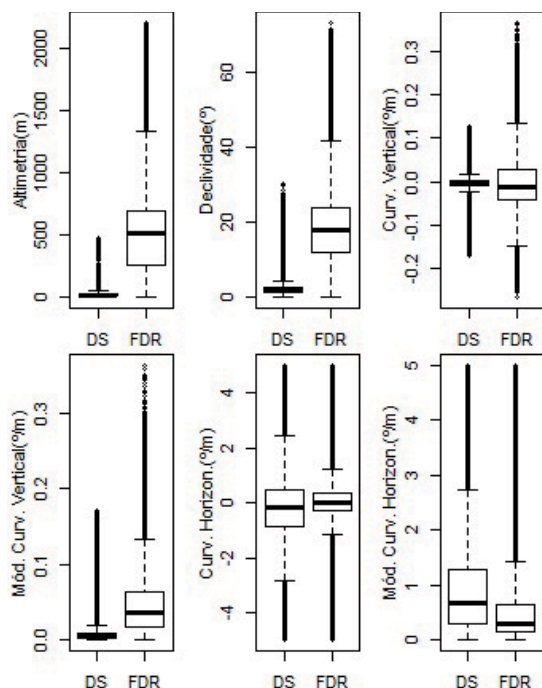


Figura 9 – Boxplots para o primeiro táxon.

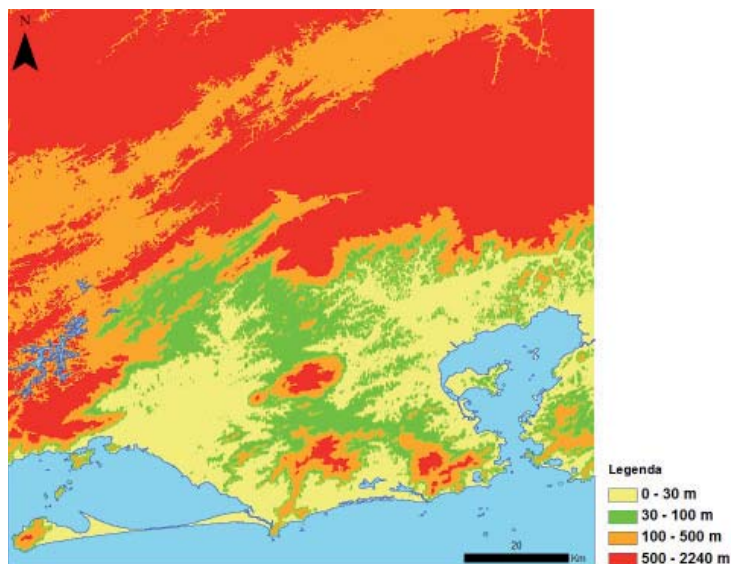


Figura 10 – Altimetria fatiada em quatro classes.

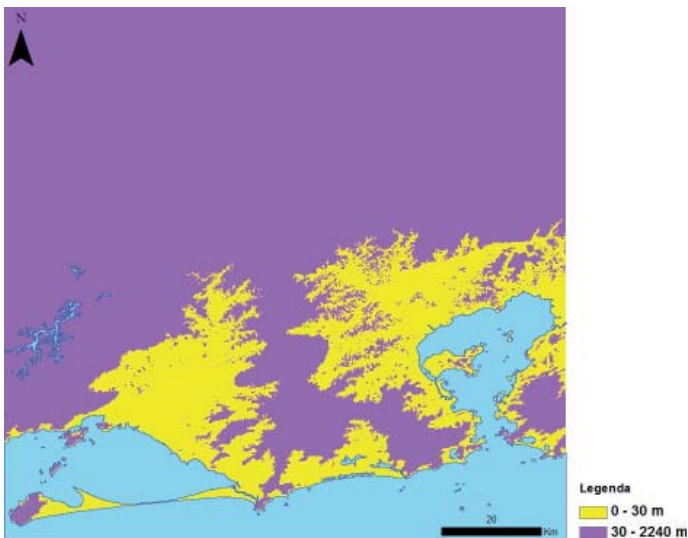


Figura 11 – Altimetria fatiada em duas classes.

Um fato a ser observado é que há ocorrência de outros depósitos sedimentares em diferentes altitudes, como, por exemplo, a planície do rio Paraíba do Sul, que por uma questão tectônica se encontra em um nível altimétrico superior em relação aos depósitos próximos ao litoral. Logo, os limiares altimétricos definidos são válidos para a condição desta área de estudo somente e não permitem uma caracterização geomorfométrica geral. Portanto, como a maior parte dos Depósitos Sedimentares mapeados pelo RADAMBRASIL, para esta área de estudo em especial, estão em áreas rebaixadas, a altimetria permitiu a distinção eficiente entre as duas classes do primeiro táxon.

As Faixas de Dobramentos Remobilizados abrigam relevos com um grande intervalo de valores de declividade, desde áreas planas localizadas nos topos de morros e relevos suaves ondulados, até as escarpas da Serra do Mar, que podem atingir 73°. Os Depósitos Sedimentares se concentram numa faixa de 0 a 4°, com pico de frequência em 1,2°. A definição de uma faixa de 0 a 7,5° pelo fatiamento da declividade, permitiu uma boa separação dos Depósitos Sedimentares (Figura 12). Notou-se que a frequência de valores das Faixas de Dobramentos Remobilizados é baixa no valor de 1,2° e que a diferença entre as médias de declividade para as duas classes é de 16,2°, o que indica uma diferença grande. Os Depósitos Sedimentares possuem um valor médio de declividade igual a 2,04°, o que caracteriza áreas planas, onde há a acumulação de sedimentos das mais diversas origens. Portanto, a declividade forneceu contribuição na separação das duas classes do primeiro táxon. Porém, áreas de planícies fluviais de menor porte dentro das Faixas de Dobramentos Remobilizados foram confundidas com a classe Depósitos Sedimentares.

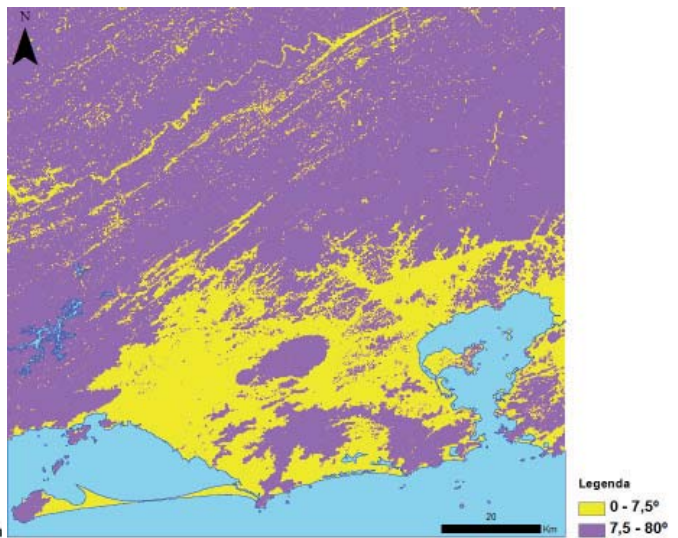


Figura 12 – Declividade fatiada em duas classes.

A curvatura vertical (CV) e o seu módulo se mostraram adequados na separação das duas classes (Figura 13). As Faixas de Dobramentos Remobilizados, com pico de frequência de -0,0183 °/m, possuem desvios padrões maiores da CV e de seu módulo maiores que os dos Depósitos Sedimentares (com pico de frequência em -0,0018 °/m). Sendo assim, os Depósitos Sedimentares estão em áreas retilíneas dentro de um intervalo de, aproximadamente, -0,015 a 0,015 °/m para CV, e de 0 a 0,015 °/m para seu módulo, ou seja, em áreas com valores próximos a 0 °/m. Enquanto que as Faixas de Dobramentos Remobilizados ocupam as áreas mais dobradas. Observou-se que a diferença entre as médias dos módulos da CV foi maior que a entre as médias da CV (0,0367 e 0,0025 respectivamente). Isso ocorreu pelo fato de que os valores brutos das curvaturas tendem a ter uma média zero. Logo, o módulo da CV pode ser considerado mais eficiente como descritor regional do terreno, já que os valores não se anulam. Além disso, o *boxplot* do módulo da CV mostra maior separabilidade entre as classes.

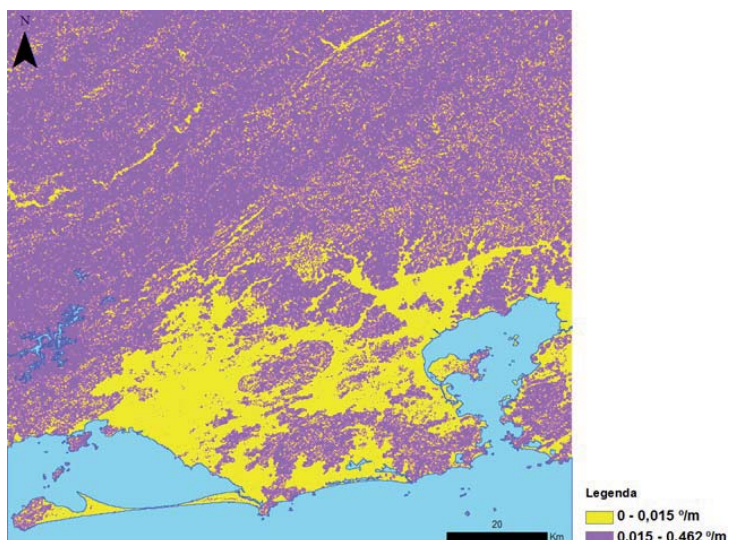


Figura 13 – Curvatura vertical fatiada em duas classes.

A curvatura horizontal (CH) e o seu módulo não se mostraram razoáveis na diferenciação das classes do primeiro táxon, pois suas distribuições nos histogramas são parecidas. Tal fato reflete a existência de segmentos convergentes, planos e divergentes de vertentes nessas duas classes. Entretanto, as distribuições da CH e do seu módulo possuem maiores desvios padrões para os Depósitos Sedimentares. Esta observação tem respaldo nos testes de desenvolvimento do algoritmo usado para CH (VALERIANO; CARVALHO JR., 2003), quando se compararam resultados entre pequenas bacias da Serra do Mar, da Depressão Periférica e do Planalto Ocidental Paulista, e, concluiu-se pela natureza local da variável a sua restrição quanto a caracterizações regionais. Por isso, a CH também não se mostrou razoável para a separação das classes nos demais táxons.

Como no caso da CV, a diferença entre as médias dos módulos da CH (~0,379) das duas classes foi maior do que a diferença entre as médias de seus valores brutos (~0,197), além disso, seu *boxplot* indica maior separabilidade entre as classes.

Segundo táxon

A Tabela 2 mostra a caracterização geomorfométrica das Colinas e Maciços Costeiros (CMC), Escarpas e Reversos da Serra do Mar (ERSM) e do Vale do Pa-

raíba do Sul (VP). As Figuras 14 e 15 mostram os histogramas e os gráficos *boxplots*. Os Depósitos Sedimentares foram separados no primeiro táxon, portanto, a Região das Planícies Litorâneas não foi considerada.

Tabela 2: Geomorfometria das classes do 2º táxon.

Variável	Classe	Mínimo	Máximo	Média	Desv. Pad.
Altimetria (m)	Colinas/Maciços Costeiros	0	947,54	118,74	144,99
	Escarpas/Rev. S. do Mar	0,47	2229,34	784,34	440,40
	V. Paraíba Sul	273,02	1267,49	550,23	130,66
Declividade (°)	Colinas/Maciços Costeiros	0,20	71,68	15,64	8,78
	Escarpas/Rev. S. do Mar	0,58	73,79	26,51	9,27
	V. Paraíba Sul	0,21	55,31	16,74	6,91
Curv. Vertical (°/m)	Colinas/Maciços Costeiros	-0,2299	0,3063	-0,0076	0,0483
	Escarpas/Rev. S. do Mar	-0,2972	0,3973	-0,0008	0,0560
	V. Paraíba Sul	-0,2187	0,2603	-0,0079	0,0577
Módulo da Curv. Vertical (°/m)	Colinas/Maciços Costeiros	0	0,3063	0,0382	0,0306
	Escarpas/Rev. S. do Mar	0	0,3973	0,0416	0,0375
	V. Paraíba Sul	0	0,2603	0,0476	0,0335
Curv. Horizontal (°/m)	Colinas/Maciços Costeiros	-4,9555	4,9721	0,0250	0,7987
	Escarpas/Rev. S. do Mar	-4,5426	4,8932	0,0261	0,5767
	V. Paraíba Sul	-5	0,2603	-0,0158	0,9180
Módulo da Curv. Horizontal (°/m)	Colinas/Maciços Costeiros	0	4,9721	0,5195	0,6072
	Escarpas/Rev. S. do Mar	0	4,8932	0,3555	0,4548
	V. Paraíba Sul	0	5	0,5879	0,7052

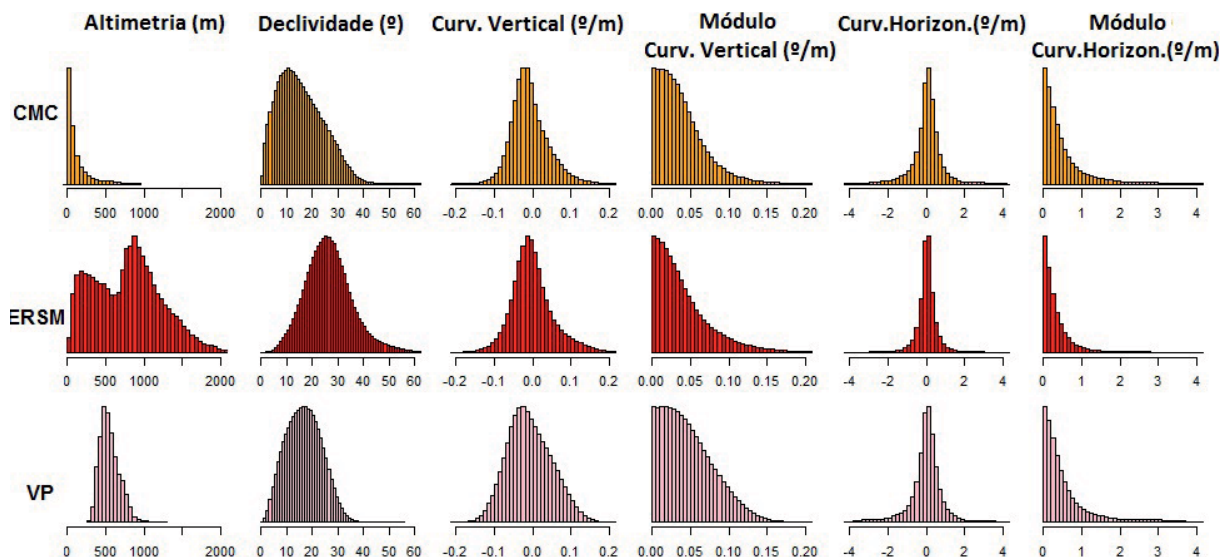


Figura 14 – Histogramas para o segundo táxon.

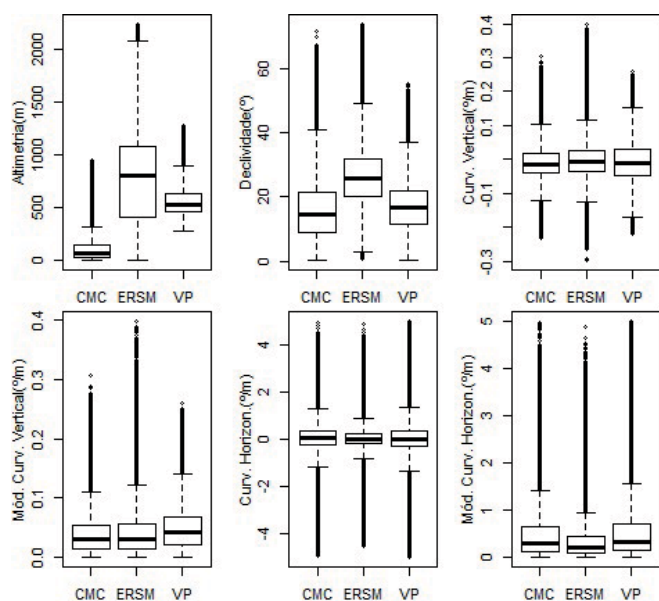


Figura 15 – Boxplots para o segundo táxon.

A Altimetria permitiu uma análise do comportamento geomorfométrico dessas três classes. Seus valores médios indicaram a existência de três grupos: o primeiro, com média de 118,74 m, refere-se à classe Colinas e Maciços Costeiros, tal valor pode ser explicado pela existência de relevos colinosos suaves a ondulados; o segundo, com média de 550,23 m, indica a classe do Vale do Paraíba do Sul, caracterizada, em sua maior parte, pelo relevo de mares de morros com altitudes mais baixas que as encontradas na Serra do Mar; e o terceiro, com média igual a 784,34 m, é indicador da classe das Escarpas e Reversos da Serra do Mar, que abrigam as maiores altitudes da área de estudo. A análise dos histogramas e dos *boxplots* de altimetria permite a definição de limiares na separação das classes (Figura 16).

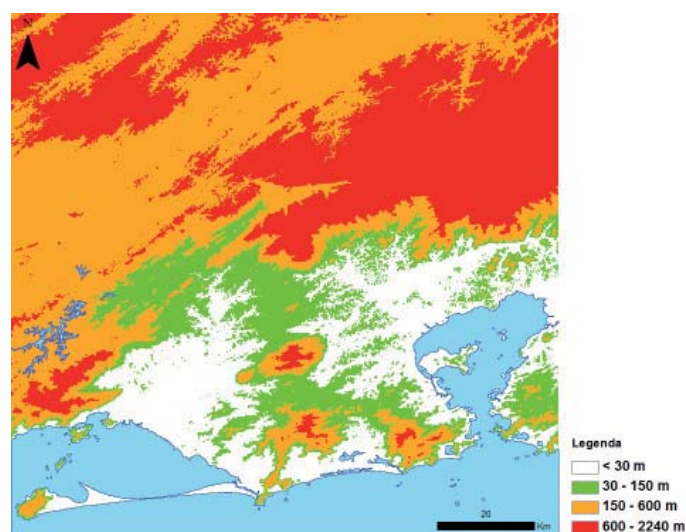


Figura 16 – Altimetria fatiada em quatro classes.

A faixa de até 150 m permitiu boa separação das colinas da classe Colinas e Maciços Costeiros, porém, os próprios maciços, que possuem altos valores de altitude, não foram incluídos nesta faixa. A faixa de 150 m até 600 m garantiu a separação da maior parte do Vale do Paraíba do Sul das demais classes, entretanto, houve confusão com os segmentos mais baixos das Escarpas e Reversos da Serra do Mar (o próprio histograma da altimetria para tal classe indica uma tendência bimodal: áreas mais baixas até 600 m e as áreas serranas com valores maiores que 600 m) e com os maciços costeiros da classe Colinas e Maciços Costeiros. E, finalmente, a faixa acima dos 600 m permite certa separação da classe Escarpas e Reversos da Serra do Mar, mas, há confusão com alinhamentos serranos existentes no Vale do Paraíba do Sul e com trechos mais altos dos maciços da Tijuca, da Pedra Branca e do Mendanha.

Os dados sugeriram que a declividade não foi adequada na diferenciação das classes do segundo táxon devido à alta confusão, apesar de que estas apresentaram valores médios de declividade que as caracterizam com lógica. As Colinas e Maciços Costeiros possuem a menor média de declividade por causa das colinas, com valor de 15,64°. O Vale do Paraíba do Sul apresentou declividade média de 16,74° devido aos mares de morros. E as Escarpas e Reversos da Serra do Mar apresentaram a maior média de declividade, com valor de 26,51°, por ocupar os relevos mais íngremes. Por causa da existência de relevos de várias declividades nas três classes, o grau de confusão foi grande ao usar a declividade na definição de limiares. Por exemplo, as áreas com valores de declividade acima de 20° poderiam caracterizar as Escarpas e Reversos da Serra do Mar, mas haveria confusão com os alinhamentos serranos do Vale do Paraíba do Sul e com os Maciços Costeiros, como os *boxplots* mostram.

As médias de CV ou de seu módulo não permitiram a separação eficiente das classes, pois os histogramas e os *boxplots* possuem comportamentos muito parecidos. Observou-se que a distribuição dos valores está concentrada, na sua maior parte, na faixa de -0,1 a 0,1°/m para a CV, e na de até 0,1°/m para o seu módulo. Entretanto, a média do módulo da CV das Escarpas e Reversos da Serra do Mar, de 0,041565°/m, é maior que as das demais classes, com valores por volta de 0,034~0,038°/m.

Terceiro táxon

A Tabela 3 mostra a caracterização geomorfométrica das classes Alinhamentos de Cristas do Paraíba do Sul (ACPS), Depressão do Médio Paraíba do Sul (DMPS), Planalto da Bocaina (PB) e Serra dos Órgãos (SO), respectivamente. As Figuras 17 e 18 mostram os histogramas e *boxplots* das VG para as classes.

Tabela 3: Geomorfometria das classes do 3º táxon.

Variável	Classe	Mínimo	Máximo	Média	Desv. Pad.
Altimetria (m)	Alin. Cris. Paraíba do Sul	353,75	1267,49	603,90	118,11
	Dep. Méd. Paraíba do Sul	282,64	617,13	389,42	51,60
	Planalto da Bocaina	23,75	1284,54	616,22	214,47
	Serra dos Órgãos	86,26	2236,17	876,72	350,79
Declividade (°)	Alin. Cris. Paraíba do Sul	0,23	55,64	16,48	7,06
	Dep. Méd. Paraíba do Sul	0,21	43,82	13,66	6,91
	Planalto da Bocaina	0,95	69,99	24,62	8,87
	Serra dos Órgãos	0,58	80,07	23,60	9,41
Curv. Vertical (°/m)	Alin. Cris. Paraíba do Sul	-0,2223	0,2603	-0,0072	0,0566
	Dep. Méd. Paraíba do Sul	-0,2187	0,2214	-0,0126	0,0509
	Planalto da Bocaina	-0,2413	0,3120	0,0020	0,0548
	Serra dos Órgãos	-0,3370	0,4621	-0,0036	0,0574
Módulo da Curv. Vertical (°/m)	Alin. Cris. Paraíba do Sul	0,0000	0,2603	0,0468	0,0328
	Dep. Méd. Paraíba do Sul	0,0000	0,2214	0,0421	0,0313
	Planalto da Bocaina	0,0000	0,3120	0,0407	0,0367
	Serra dos Órgãos	0,0000	0,4621	0,0436	0,0376
Curv. Horizontal (°/m)	Alin. Cris. Paraíba do Sul	-5,0000	4,9894	-0,0220	0,9268
	Dep. Méd. Paraíba do Sul	-4,9927	4,9828	-0,0581	0,9692
	Planalto da Bocaina	-4,9285	4,9554	0,0148	0,6697
	Serra dos Órgãos	-4,9381	4,9566	-0,0034	0,6770
Módulo da Curv. Horizontal (°/m)	Alin. Cris. Paraíba do Sul	0,0000	5,0000	0,5872	0,7173
	Dep. Méd. Paraíba do Sul	0,0000	4,9927	0,6362	0,7335
	Planalto da Bocaina	0,0000	4,9554	0,3880	0,5461
	Serra dos Órgãos	0,0000	4,9566	0,4222	0,5292

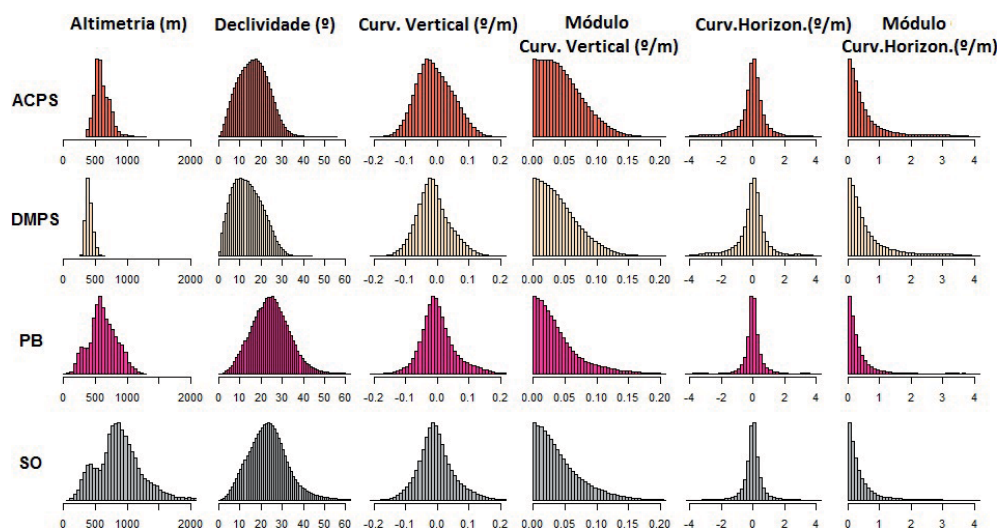


Figura 17 – Histogramas para o terceiro táxon.

Na separação dos ACPS e DMPS, apenas a altimetria exibe um padrão que garante essa diferenciação. As demais VG não mostraram potencial para o caso do presente trabalho, uma vez que além de suas distribuições serem parecidas, suas estatísticas possuem valores próximos. Entretanto, o histograma e *boxplot* da declividade mostram alguma separabilidade entre as classes, uma vez que os alinhamentos serranos dos ACPS fazem com que ocorram valores de declividade maiores nesta classe. Desse modo, o pico de frequência dos

ACPS fica próximo aos 20°, enquanto que dos DMPS fica mais próximo aos 10°.

Houve apenas uma diferença de altitude entre as duas classes. A média de altitude da DMPS é de 398,42 m, enquanto a dos ACPS é de 603,90 m, o que permitiu uma divisão na classe Vale do Paraíba do Sul no segundo táxon. Esse fato pode ser justificado pela existência do gráben do Paraíba do Sul, onde a faixa que acompanha o rio se encontra rebaixada em relação aos relevos adjacentes, como descrito por Almeida e Carneiro (1998).

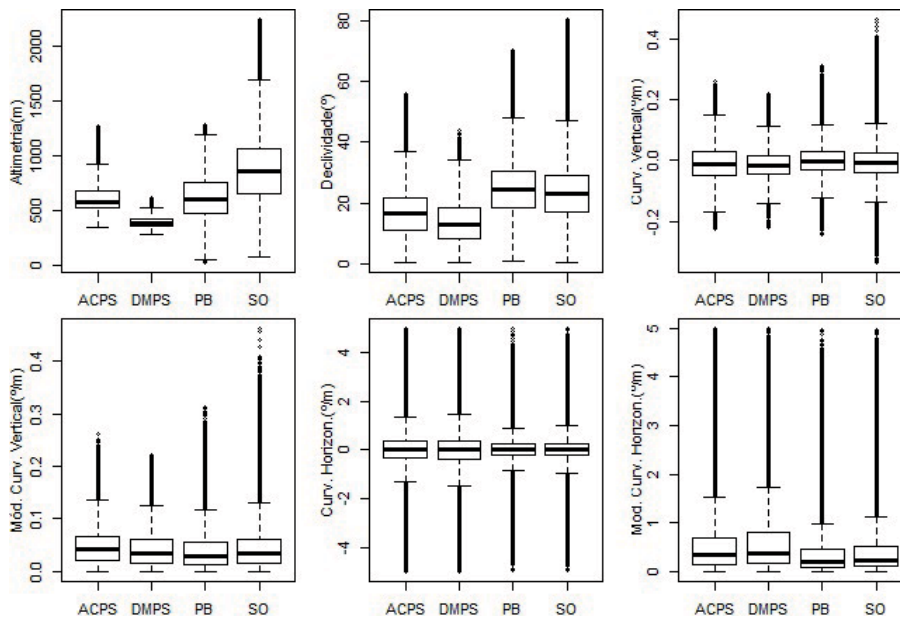


Figura 18 – Boxplots para o terceiro táxon.

O Desvio Padrão da altitude da DMPS é menor que o dos ACPS, o que mostra que a distribuição da altitude da primeira é mais concentrada em torno da média. O exame dos histogramas das classes permitiu concluir que os valores da DMPS estão distribuídos, na sua maior parte, na faixa de 282 m até 450 m, com pico de frequência em 382,33 m. Já os ACPS possuem um histograma que começa em, aproximadamente, 353,75 m e com pico de frequência em 554,41 m, e exibe baixa frequência de valores até aproximadamente 450 m. Isso levou a concluir que a altimetria permitiu separação entre as duas classes. Apesar da Figura 19 mostrar certa confusão entre as subclasses do VPS, Maciços Costeiros e as Escarpas e Reversos da Serra do Mar, em uma estrutura hierárquica das classes, estas duas últimas já teriam sido separadas no segundo táxon. Portanto, a DMPS está localizada em áreas de 340 até 450 m, enquanto que os ACPS estão em relevos superiores a 450 m.

Os dados levaram a concluir que o Planalto da Bocaina e a Serra dos Órgãos são geomorfometricamente semelhantes e somente as VG aplicadas no presente trabalho não permitiram a separação entre as duas classes, devido ao alto grau de confusão, já que as distribuições se sobrepõem. Entretanto, o Planalto da Bocaina possui altitude máxima de 1284,54 m e pico de frequência em 557,73 m, enquanto que a Serra dos Órgãos possui altitude máxima de 2236,17 m e pico de frequência em 853,48 m. A semelhança geomorfométrica pode ser explicada por processos formadores semelhantes, já que as classes pertencem a Serra do Mar (ALMEIDA; CARNEIRO, 1998).

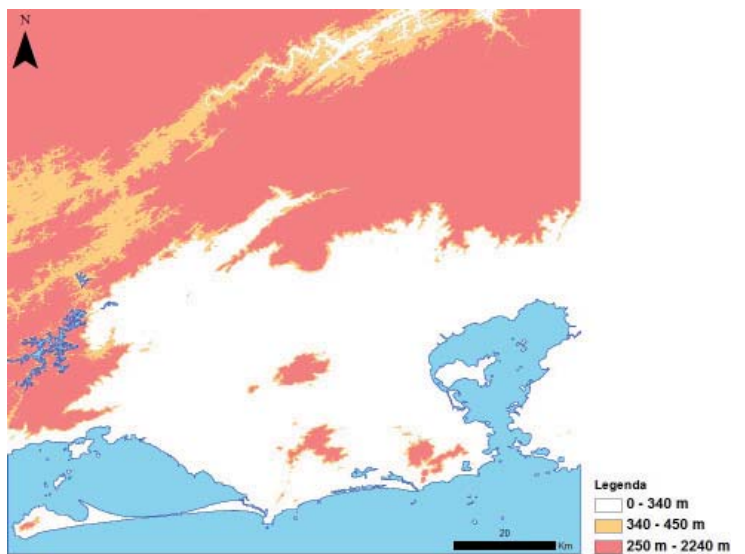


Figura 19 – Altimetria fatiada em três classes.

Conclusão

Os dados SRTM permitiram, no geral, a caracterização geomorfométrica regional, tanto visual quanto quantitativa, das classes de relevo RADAMBRASIL para cada nível taxonômico. Por tais caracterizações, foi possível indicar as VG que permitem a separação entre classes. Entretanto, para classes semelhantes geomorfometricamente, como o Planalto da Bocaina e Serra dos Órgãos no terceiro táxon, não foi possível separá-las com as VG utilizadas pelas metodologias adotadas no presente trabalho.

Como a escala dos dados geomorfométricos é superior a do mapa original (1:1.000.000), as VG mostram potencial para o detalhamento temático do mapeamento. Este fato é respaldado tanto pelas relações identificadas na análise visual, quanto pela análise das distribuições dos valores nos histogramas. Além disso, os dados estatísticos permitiram identificar limiares com potencial de definir as classes geomorfológicas do RADAMBRASIL.

As classes que mais se diferenciaram por uma maior quantidade de VG foram as classes do primeiro nível taxonômico, em que a altimetria, declividade e curvatura vertical mostraram potencial na separação dos Domínios Morfoestruturais. Nos demais táxons, menos VG foram indicadas, e houve maior grau de confusão entre classes.

As análises empregadas serviram para recuperar um modelo de conhecimento implícito no mapa RADAMBRASIL a partir das VG, que permitiram o entendimento do comportamento geomorfométrico das classes, e assim, fazer algumas relações com seus processos formadores. Tal conhecimento implícito pode ser utilizado para atualização e refinamento do mapa, pois não é sempre possível contar com a disponibilidade dos autores antigos para realizar tal tarefa.

Referências bibliográficas

- ALMEIDA, F. F. M.; CARNEIRO, C. D. R. Origem e evolução da serra do mar. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 28, n. 2, p. 135-150, 1998.
- ANDERS, N. S.; SEIJMONSBERGEN, A. C.; BOUTTEN, W. Segmentation optimization and stratified object-based analysis for semi-automated geomorphological mapping. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 12, p. 2976-2985, 2011.
- BARBOSA, G. V. Cartografia geomorfológica utilizada pelo projeto RADAM. In: In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 27., Aracaju, 1973, **Anais...** Aracaju, SBG, 1973, v.1, p. 427-433.
- BISPO, P. C.; VALERIANO, M. M.; KUPPLICH, T. M. Variáveis geomorfométricas locais e sua relação com a vegetação da região do interflúvio Madeira-Purus (AM-RO). **Acta Amazônica**, v. 39, n. 1, p. 81-90, 2009.
- CAMARGO, F. F.; ALMEIDA, C. M.; FLORENZANO, T. G.; HEIPKE, C.; FEITOSA, R. Q.; COSTA, G. A. O. P. ASTER/Terra Imagery and a Multilevel Semantic Network for Semi-automated Classification of Landforms in a Subtropical Area. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 77, n. 6, p. 619-629, 2011.
- CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO BRASILEIRO. **Rio de Janeiro**. Brasília, 2001. 417 p.
- DRAGUT, L.; BLASCHKE, T. Automated classification of landform elements using object-based image analysis. **Geomorphology**, v. 81, n. 3-4, p.330-344, 2006.
- DRAGUT, L.; EISANK, C. Automated object-based classification of topography from SRTM data. **Geomorphology**, v. 141-142, n. 1, p. 21-33, 2012.
- ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE (ESRI). **ArcGIS**. Version 9.3. Software. 2008
- HENGL, T.; REUTER, H. **Geomorphometry: concepts, software, applications**. Amsterdam: Elsevier, 2009. 765p.
- ITT Visual Information Solutions. **ENVI 4.7**. Version 4.7. Boulder, Colorado, EUA, 2009.
- MUÑOZ, V. A. **Análise geomorfométrica de dados SRTM aplicada ao estudo das relações solo-relevo**. 2009. 112 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009.
- QI, F.; ZHU, A. Knowledge Discovery from soil maps using inductive learning. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 17, n. 8, p.771-795, 2003.
- 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, 1983. 780 p. (Levantamento de Recursos Naturais, 32).
- RODRÍGUEZ, E.; MORRIS, S. C.; BELZ, J. E. A global assessment of the SRTM performance. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 72, n. 3, p.249-260, 2006.
- ROSS, J. L. S. O registro cartográfico dos fatos geomórficos e a questão da taxonomia do relevo. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 6, p. 17-29, 1992.
- SILVA, T. M. **A Estruturação Geomorfológica do Planalto Atlântico no Estado do Rio de Janeiro**. 2002. 265 p. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2002
- VALERIANO, M. M. **Topodata: guia para utilização de dados geomorfológicos locais**. São José dos Campos: INPE, 2008. 72 p.
- VALERIANO, M. M.; CARVALHO JR.; O. A. Geoprocessamento de modelos digitais de elevação para mapeamento da curvatura horizontal em microbacias. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 4, n. 1, p. 17-29, 2003.
- VALERIANO, M. M.; KUPPLICH, T. M.; STORINO M.; AMARAL, B. D.; MENDES JR., J. N.; LIMA, D. J. Modelin small watersheds in Brazilian Amazonia with shuttle radar topographic mission - 90 m data. **Computers & Geosciences**, v. 32, n. 8, p. 1169-1181, 2006.
- TOUTIN, T. RADARSAT-2 stereoscopy and polarimetry for 3D mapping. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 30, n. 3, p. 496-503, 2004.

