UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE FILOSOFIA, LETRAS E CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA

LEONARDO TAKEI KAWATA

**ANÁLISE DE IMAGENS BASEADA EM OBJETOS GEOGRÁFICOS (*GEOBIA*)
APLICADA AO MAPEAMENTO DA TRANSIÇÃO ENTRE CINTURÃO OROGÊNICO
DO ATLÂNTICO E BACIA SEDIMENTAR DO PARANÁ**

São Paulo

2014

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE FILOSOFIA, LETRAS E CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA FÍSICA

**ANÁLISE DE IMAGENS BASEADA EM OBJETOS GEOGRÁFICOS (*GEOBIA*)
APLICADA AO MAPEAMENTO DA TRANSIÇÃO ENTRE CINTURÃO OROGÊNICO
DO ATLÂNTICO E BACIA SEDIMENTAR DO PARANÁ**

Leonardo Takei Kawata

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia Física do Departamento de Geografia da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo, para a obtenção do Título de Mestre em Geografia Física

Orientador: Prof. Dr. Jurandyr Luciano Sanches Ross

São Paulo

2014

Dedico este trabalho ao Moacir, Nanci,
Miyoko, Yukiko e Juliana.

AGRADECIMENTOS

Aos meus queridos avós Tuneo e Miyoko Takei, Katsuyuki e Yukiko Kawata, por terem se sacrificado tanto para me proporcionar momentos como este.

À Nanci e ao Moacir Kawata, que sempre acreditaram em mim.

Aos familiares, especialmente, Marcelo, Lucas, Ayumi, Shinya, Sumie, Monica, Erica, Shigueaki, Sandra, Anderson, Erick, Yuji, Nobuo, Beth, Julia, Silvia, João, Luly, Gabriel, Akira, Katia, Rafael e Marcos por fazerem parte de todo o processo.

À Juliana Maestu, por todo o carinho, paciência e apoio nas horas em que mais precisei. À Família Nambara e Família Maestu, agradeço pelo acolhimento e confiança.

Ao Pedro Kenzo Numada Kawata, que cativa meu senso de responsabilidade.

Ao meu orientador Jurandyr Ross pela confiança depositada em mim durante todos esses anos.

À Marisa, toda a equipe do Laboratório de Geomorfologia e “público frequentador”, Alex, Jader, Luciana Cordeiro, Roberto Vervloet, Profa Cleide Rodrigues, Rogério Gayoso, Rodrigo Lima, Tupy, Natália Golubeff, Paulo Castro, Willian dos Santos, Tullius Nery, Rodolfo Luz, Fernando Villela e Max Furrier, que me proporcionaram muitos momentos de aprendizado.

Ao Ricardo Felício, por contribuir imensamente na minha formação acadêmica e científica.

Ao Marcos e a toda a equipe do Laboratório de Pedologia, pelas inúmeras contribuições para o trabalho, seja nas discussões extremamente enriquecedoras ou o campo. Serei eternamente grato.

Ao Rogério Rozolen e toda a equipe do Laboratório de Climatologia e Biogeografia, pelo apoio.

Aos geógrafos Flavio Fortes de Camargo e Pedro Fernandes, além do pesquisador Marcio de Morisson Valeriano, pelo inestimável auxílio com orientações sobre Sensoriamento Remoto, geomorfologia, mineração de dados e OBIA.

Ao Prof. Dr. Kenitiro Suguio, pelas orientações de cunho científico.

À pesquisadora Cláudia Maria de Almeida, pelo auxílio com a base conceitual da GEOBIA.

Ao amigos Oswaldo Iwasa, Fernando Lampião e toda a equipe da Regea Geologia e Estudos Ambientais, pelas inúmeras oportunidades profissionais e por contribuírem muito com o meu amadurecimento técnico e acadêmico. Agradecimento especial para Cyntia, Nana, Francis e Mariana Fagundes pelas diversas discussões sobre Sensoriamento Remoto e GIS.

Ao Pedro Skrotho Machado Simões, ao Fares Ferreira Pessoa e à Mixela Odete dos Santos, pela parceria fora de série no trabalho árduo e por todo aprendizado.

Aos amigos de Brasília que contribuíram muitíssimo para o trabalho (cada um a sua maneira). Em especial, agradeço ao Fernando Corrêa, Daniel, Leonardo Hislei, Alonso, Carol, Maria Lucia, Marcos Ventura, Marcelo Salles, Cristiane Peralta, Ernesto e toda a equipe do Departamento de Obras e Serviços de Acessos Aquaviários da SEP/PR. Ao Alarico e Liliane, pelas contribuições na parte de geologia.

À Naissa Luz e à Carol Bergamo, para quem eu devo um rim pela ajuda com o software eCognition.

Ao Fares, Jader Santos, Mariana Claro, Bruno Souza, Leonardo Hislei e Fernando Corrêa, pelo apoio num momento extremamente crítico do trabalho.

Ao Prof Carlos Grohmann e ao Fernando Lampião, pelas orientações com o SRTM.

Aos professores do Depto de Geografia da FFLCH-USP, que contribuíram com o meu crescimento intelectual. Esta dissertação é resultado do acúmulo de todo este conhecimento. Destaco agradecimento especial aos professores que mais contribuíram para este trabalho: Luis Venturi, Rosely Pacheco, Deborah de Oliveira, Adilson Avansi de Abreu e Ailton Luchiar.

Ao amigo e geógrafo Nilo Teixeira, pelo auxílio com a análise estatística.

À cidade de Brasília, pelas oportunidades.

À Tia Miti, Tio Shuji, Tia Cida, Gabriel, Juninho e toda a família, que me acolheram e facilitaram minha adaptação ao Planalto Central.

Ao Governo da Província de Okayama e toda a equipe da Universidade de Okayama, que me proporcionaram a oportunidade de gerar o embrião da pesquisa. Em especial à Dra. Judith Tayra, Prof. Koji Kurihara e Fumio Ishioka, pelas orientações de estudo.

À Associação Cultural Okayama Kenjin, em especial ao Presidente Kenzo Nenguishi e à Sra. Satie Sasaki, pela importante participação no processo de Intercâmbio no Japão.

Ao Prof e amigo Marcon, por ter participado do processo desde o início.

A toda a equipe do Anglo Guarulhos, em especial Rauni, Caio, Danilo, Almir, Amilton e Hiroshi, pelos ensinamentos que transcendem aos conhecimentos geográficos. Ao amigo Emmanuel Lisboa, pelo imenso auxílio com a revisão do texto.

Aos amigos da graduação Bruno, Janaína, Vitinho, Daniel Salles, Beirão, Franco, Leo, Augusto e Thiago pela participação no processo desde a graduação.

À Eletrica Takei, pelo auxílio financeiro no início desta dissertação.

À Sociedade Esportiva Palmeiras, por fazer parte da minha vida.

Este trabalho é a materialização de um processo de amadurecimento pessoal e intelectual. Agradeço àqueles que, apesar de não terem sido citados, fizeram parte disso tudo.

“If I have been able to see farther, it was only
because I stood on the shoulders of giants”

Sir Isaac Newton 1765

RESUMO

O uso de geotecnologias pode contribuir de forma muito significativa para os estudos em geomorfologia. Considerando os principais componentes desta ciência, morfografia, morfometria, morfogênese e morfocronologia, os modelos digitais para a representação da superfície da Terra podem ser amplamente utilizados na aquisição de muitas destas informações.

O uso de Modelos Digitais de Elevação (MDE) há alguns anos, já é uma realidade em estudos envolvendo geomorfologia. A sua utilização permite a aquisição de variáveis e parâmetros objetivos que podem servir à definição de critérios para o agrupamento de unidades geomorfológicas. Podendo, portanto, ser um instrumento valioso para mapeamento de áreas amplas em escalas de 1:50.000 e 1:100.000. Para tanto, é necessário definir os critérios coerentes e os algoritmos de segmentação que oferecem os melhores resultados para as diversas áreas de estudo.

Os MDE gerados pela missão *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) são de vasta abrangência e contemplam todo o território nacional brasileiro. Portanto, os dados gerados pela missão podem ser uma importante fonte de informação para mapeamentos com metodologia única.

O alcance deste objetivo não garante avanços metodológicos na cartografia geomorfológica, tendo em vista que a possibilidade de comparação entre diferentes cartas geomorfológicas de detalhe ainda é restrita.

Palavras Chave: Geomorfologia, Modelos Digitais de Elevação (MDE), Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), Segmentação

ABSTRACT

Geotechnologies can contribute significantly to geomorphology studies. Whereas the main principles of this science, morphography, morphometry, morphogenesis and morphochronology, the digital models used to represent the Earth surface can be widely utilized in a bunch of these data. Lately, the use of Digital Elevation Model (DEM) can be considered a reality in geomorphology studies. The utilization allows the acquisition of objective variables and parameters that can be suitable for definition of geomorphological units. Hence, can be a valuable tool for wide area mapping using 1:50.000 and 1:100.000 scales. For that reason, it is necessary to define coherent criteria and the proper segmentation algorithm in order to reach better results for different study cases. DEM provided by Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) are wide range and cover the whole national territory. Therefore, data provided by this mission can be an important information for a single methodology mapping project.

Key Words: Geomorphology, Digital Elevation Model (DEM), Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), Segmentation

SUMÁRIO

“If I have been able to see farther, it was only because I stood on the shoulders of giants”	7
Sir Isaac Newton 1765	7
1 INTRODUÇÃO	16
2 OBJETIVOS	16
3 JUSTIFICATIVA	17
4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICO-METODOLÓGICA	17
4.1 A Cartografia Geomorfológica	17
4.2 Interferometria SAR (InSAR) e Modelos Digitais de Elevação (MDE)	23
4.3 <i>Shuttle Radar Topography Mission</i> (SRTM)	30
4.4 Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC)	34
4.5 Princípios de interpretação visual em geociências	37
4.6 Abordagem quantitativa para análise de dados espaciais a partir de variáveis geomorfométricas	40
4.7 Análise Orientada a Objetos Geográficos (GEOBIA)	41
4.8 Segmentação Multirresolução	43
4.9 Rede Semântica Hierárquica e Logica Fuzzy	44
4.10 Avaliação de Classificação – Acurácia Global e Matriz de Erros	46
5 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	47
6 MATERIAIS E MÉTODOS	50
6.1 Materiais	50
6.2 Métodos	51
6.2.1 Análise Preliminar	53
6.2.2 Organização e integração dos dados para o modelo cognitivo	53
6.2.3 Análise exploratória da área de estudo	65

6.2.4	Conversão de chaves de interpretação em atributos da rede semântica	80
6.2.5	Classificação por Análise de Imagens Orientada a Objetos Geográficos (GEOBIA) 84	
6.2.6	Avaliação quantitativa da classificação	89
7	RESULTADOS	91
7.1	Segmentação Multirresolução do “Nível Água”	91
7.2	Classificação do “Nível Água”	92
7.3	Segmentação Multirresolução do “Nível Morfoestrutura (1º Táxon)”	93
7.4	Classificação do “Nível Morfoestrutura (1º Táxon)”	94
7.5	Tentativas de Classificação para o “Nível Morfoescultura (2º Táxon)” e “Nível Padrões de Formas Semelhantes (3º Táxon)”	96
7.6	Análise de incertezas e acurácia da classificação	96
8	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	99
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103
	APÊNDICES	113
	APÊNDICE A – Árvore de Processos (Process Tree)	113
	APÊNDICE B – Funções de Pertinência (Membership Function)	114
	ANEXOS	116

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1 – Espectroeletr magnético com destaque para a faixa de microondas e a separação de bandas denominadas por letras. Fonte: Dutra (2003)	24
Figura 4.2 – Geometria do Sistema SAR – Fonte: Adaptado de Hanssen (2001) in Rodrigues (2010).....	26
Figura 4.3 – Método InSAR para a obtenção de informação de elevação. $A1$ e H são a posição e altura do satélite, respectivamente. R indica o componente <i>slant range</i> e h a elevação de um ponto P no nível do solo. – Fonte: TOUTIN & GRAY (2000).....	27

Figura 4.4 - Representação dos modelos de elevação pelas técnicas de grade regular e <i>triangular irregular network</i> . Fonte: Grohmann (2008).....	28
Figura 4.5 – Área de cobertura de dados da missão SRTM. Fonte: http://radiomobile.pe1mew.nl/?Geodata:SRTM acesso em 13 de março de 2013.....	31
Figura 4.6 – Representação esquemática do <i>Endeavour</i> e disposição dos equipamentos. (KEYDEL, 2007)	32
Figura 4.7 – Visão artística em perspectiva da aquisição de dados pelo ônibus espacial <i>Endeavour</i> durante a missão SRTM. Fonte: http://srtm.usgs.gov/index.php acesso em 13 de março de 2013.	32
Figura 4.8 – Diferentes procedimentos de reamostragem do SRTM adotados pela NASA (dado coletado) e pelo USGS (média obtida para cada célula de 1 arcsec) para a geração de modelos com resolução espacial de 90m. (GROHMANN, 2008).....	33
Figura 5.1 – Mapa de localização da área de estudo	48
Quadro 6.2 – Aplicativos utilizados na coFigura 6.1ndução do trabalho	51
Figura 6.2 – Fluxograma com os procedimentos metodológicos utilizados.	52
Figura 6.3 – Distribuição das bandas dos sensores ETM+, OLI e TIRS ao longo do espectro eletromagnético. Fonte: http://landsat.usgs.gov/ldcm_vs_previous.php	54
Figura 6.4 – Layout do Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo (ROSS & MOROZ, 1997) organizado para os experimentos realizados nesta dissertação.....	56
Figura 6.5 – Layout de Mapa Geológico da área de estudo elaborado a partir dos dados shapefile disponibilizados pelo CPRM (2004) para a Folha SF23 – Rio de Janeiro.....	57
Figura 6.6 – Faixas de imageamento da Folha SF-23-Y-A Campinas. Foram utilizadas, para a análise visual, as faixas de número 4, 5, 6 e 7 – Fonte: Serviço Geológico do Brasil-CPRM	58
Figura 6.7 – Comparação entre Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo (ROSS & MOROZ, 1997) e Mosaico de imagens georreferenciadas do Projeto Radam-D.....	59
Figura 6.8 – Unidades geomorfológicas mapeadas pelo Projeto RADAMBRASIL correspondentes à área de estudo. O mapa georreferenciado foi utilizado apenas para comparação visual.	60
Figura 6.9 – Mosaico SRTM v3.0 utilizado na presente dissertação.....	61

Figura 6.10 – Diferença nos métodos de reamostragem de dados SRTM. A esquerda está representado o <i>Sampling Method</i> , à direita o <i>Averaging Method</i> .	62
Figura 6.11 – Mapa clinográfico (declividades) da área de estudo elaborado a partir do MDE SRTM V3.	63
Figura 6.12 – Comparação entre o mosaico de imagens SF-23-A fornecidas pelo Projeto Radam-D e relevo sombreado gerado a partir de dados SRTM V3.0 com azimuth 90° e elevação 45°.	64
Figura 6.13 – Divisão expedita dos trechos da área de estudo.	66
Figura 6.14 – Comparativo entre Mapa Hipsométrico e Geomorfológico	68
Figura 6.15 – Comparativo entre Mapa Clinográfico e Geomorfológico	69
Figura 6.16 – Comparativo entre relevo sombreado gerado a partir do MDE SRTM e Mapa Geomorfológico	71
Figura 6.17 – Perfis topográficos W-E, transversais à faixa de transição entre Cinturão Orogênico do Atlântico e Bacia Sedimentar do Paraná.	72
Figura 6.18 – Exemplo de dado raster <i>slope</i> (direita), representado em graus (°) e gerado no aplicativo ArcGIS a partir de um MDE (esquerda). Fonte: ArcGIS 10.2 Desktop Help	73
Figura 6.19 – Terrenos correspondentes às altitudes abaixo de 580m	75
Figura 6.20 – Terrenos correspondentes à faixa de altitude entre 580 e 610m.	75
Figura 6.21 – Terrenos correspondentes à faixa de altitude entre 610 e 660m.	76
Figura 6.22 – Terrenos correspondentes à faixa de altitude entre 680 e 780m.	76
Figura 6.23 – Terrenos correspondentes à faixa de altitude acima de 780m.	77
Figura 6.24 – Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo (ROSS & MOROZ, 1997)	78
Figura 6.25 – Fluxograma de Procedimentos Operacionais para a classificação por GEOBIA	84
Figura 6.26 – Exemplo de produto do algoritmo de segmentação multirresolução com <i>scale parameter</i> : 30; <i>shape</i> : 0.1; e <i>compactness</i> : 0.5	86
Figura 6.27 - Exemplo de produto do algoritmo de segmentação multirresolução com <i>scale parameter</i> : 120; <i>shape</i> : 0.1; e <i>compactness</i> : 0.5	86

Figura 6.28 - Exemplo de produto do algoritmo de segmentação multirresolução com <i>scale parameter</i> : 800; <i>shape</i> : 0.1; e <i>compactness</i> : 0.5.....	87
Figura 6.29 – Exemplo de objetos gerados pelo algoritmo Segmentação Multirresolução com <i>Scale parameter</i> : 100; <i>Shape</i> : 0.9; <i>Compactness</i> : 0.9	88
Figura 6.30 – Exemplo de objetos gerados pelo algoritmo Segmentação Multirresolução com <i>Scale Parameter</i> : 100; <i>Shape</i> : 0.5; <i>Compactness</i> : 0.1	88
Figura 6.31 – Alocação de pontos aleatórios sobre a faixa de testes da classificação.	89
Figura 6.32 – Alteração do limite entre Cinturão Orogênico do Atlântico e Bacia Sedimentar do Paraná elaborado posteriormente ao trabalho de campo (em vermelho)	90
Figura 7.1 – Resultado da classificação do “Nível Água”. A cor azul representa os reservatórios, ao passo que o ocre, as terras emersas.....	92
Figura 7.2 – Hierarquia de classes representada no ambiente do eCognition Developer 8.....	94
Figura 7.3 – Resultado obtido pela Segmentação Multirresolução do “Nível Água” posterior classificação das Unidades Morfoestruturais. Em verde, está representada a Bacia Sedimentar do Paraná, ao passo que as áreas em lilás correspondem ao Cinturão Orogênico do Atlântico.	95

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 6.1 –Diagrama de dispersão dos valores de altitude e declividade da área de estudo .	74
Gráfico 6.2 – Boxplot dos dados de altitude para as unidades de padrão de formas semelhantes mapeadas por Ross & Moroz (1997).	78
Gráfico 6.3 - Boxplot dos dados de declividade para as unidades de padrão de formas semelhantes mapeadas por Ross & Moroz (1997).	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 7.1 – Atributos utilizados para separação de Reservatórios e Terras Emersas. O valor do DN indicado corresponde ao dado padrão das imagens Landsat 8, no formato <i>16-bit unsigned integer</i>	92
---	----

Tabela 7.2 – Variáveis e atributos utilizados na Classificação do Nível Morfoestrutura (1º Táxon).....	94
Tabela 7.3 – Matriz de erro elaborada para a transição entre Cinturão Orogênico do Atlântico e Bacia Sedimentar do Paraná.	97
Tabela 7.4 – Cálculos de Acurácia Global, do Produtor e do Usuário.....	97
Tabela 7.5 – Matriz de erro elaborada posteriormente à realização dos levantamentos de campo e edição manual.....	98
Tabela 7.6 – Medidas de acurácia global, do produtor e do usuário calculadas posteriormente aos levantamentos de campo e edição manual.....	98

LISTA DE QUADROS

Quadro 4.1 – Elementos utilizados na elaboração de chaves de interpretação – Fonte: Adaptado de NOVO (2008).....	38
Quadro 4.2 – Classes de variáveis geomorfológicas.Fonte: Shary et al (2002).....	41
Quadro 4.3 – Exemplo de Matriz de Erro (CONGALTON, 2001)	47
Quadro 6.1 – Materiais utilizados para o desenvolvimento da dissertação.	51
Quadro 6.2 – Aplicativos utilizados na coFigura 6.1Indução do trabalho	51
Quadro 6.3 – Organização das Conversão de Chaves de Interpretação, que foram, posteriormente, utilizadas para a elaboração da rede semântica.	83
Quadro 7.1 – Parâmetros utilizados no algoritmo de segmentação multirresolução para o nível água	91
Quadro 7.2 - Parâmetros utilizados no algoritmo de segmentação multirresolução para o nível morfoestrutura (1º Táxon).....	93

1 INTRODUÇÃO

A visão estereoscópica obtida por fotografias aéreas, por muito tempo, ocupou posição de maior destaque dentre as técnicas de sensoriamento remoto para mapeamentos geomorfológicos. Atualmente, com o advento das imagens digitais, em especial orbitais, ampliaram-se as possibilidades de utilização deste valioso instrumental, pode-se recorrer a filtros, operações envolvendo as diferentes bandas, algoritmos de segmentação, entre outras. As imagens digitais não são apenas visualmente úteis, são, também, importantes fontes de informação, a partir das quais é possível tornar a interpretação da paisagem mais objetiva.

Apesar da importância da parametrização para ciências que estudam a realidade, como é o caso da Geografia (VENTURI, 2008), esta é uma fonte de informação pouco utilizada, se considerado o potencial que oferece. No Departamento de Geografia da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas – FFLCH-USP, o uso dessa técnica é recorrente, apesar de ser bem menos frequente que em outras instituições de ensino e pesquisa. Esses trabalhos apresentam como traço comum a demonstração do grande potencial oferecido pelas análises parametrizadas nos estudos em geomorfologia.

Nesse contexto, foi feito neste trabalho uma comparação entre uma metodologia de mapeamento geomorfológico consagrada no meio técnico-acadêmico e uma classificação do relevo utilizando técnicas semi-automatizadas. Nessa comparação, foram avaliados os parâmetros mais importantes e coerentes dos mapeamentos geomorfológicos.

2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é verificar a viabilidade e eficiência da Análise de Imagens Orientada a Objetos Geográficos (*Geographic Object-based Image Analysis* – GEOBIA) para mapeamento geomorfológico de parte da transição entre as Morfoestruturas Cinturão Orogênico do Atlântico e Bacia Sedimentar do Paraná, utilizando Modelos Digitais de Elevação (MDE) *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), algoritmo de segmentação multirresolução e redes semânticas hierárquicas.

Como objetivo específico, pretende-se contribuir para o acúmulo de conhecimento acerca da GEOBIA aplicada a mapas geomorfológicos em escala regional (1:500.000). Espera-se que o amadurecimento deste tipo de técnica possa, no futuro, contribuir com mapeamentos em diversas escalas.

3 JUSTIFICATIVA

A Geomorfologia é um campo do conhecimento fundamental a diversas áreas ligadas às ciências da terra. Tal característica permite que figure no escopo de pesquisas puras, relacionadas à compreensão da evolução e dinâmica da paisagem, ou em estudos mais aplicados, como vulnerabilidade à erosão, geologia de engenharia e ambiental. Nesse contexto, a cartografia geomorfológica é um importante instrumento de síntese e análise acerca dos fatos geomorfológicos.

AB'SÁBER (1969) levantava que o problema da abrangência dos mapas geomorfológicos é uma questão ainda distante de uma solução razoável, tendo em vista que depende de produtos da cartografia sistemática, um dos entraves para a execução de mapeamentos regionais. Atualmente, os Modelos Digitais de Elevação (MDE) gerados pelo *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), bem como outras iniciativas de mapeamento sistemático a nível global e regional, apresentam um enorme salto qualitativo e quantitativo na disponibilidade de informação e podem servir para a elaboração de mapas geomorfológicos. Muitas das lacunas no mapeamento sistemático nacional podem ser minimizadas com a utilização desses MDE, que foram elaborados com metodologia única para toda a extensão do território brasileiro (Interferometria de dados de *Synthetic Aperture Radar* – InSAR), e ainda permitem a comparação entre os resultados e parâmetros adotados.

Assim, a Análise Orientada a Objetos Geográficos proposta neste trabalho representa uma grande possibilidade de utilização dos MDE SRTM para mapeamentos geomorfológicos, pois permite a associação entre técnicas tradicionais, análise estatística dos dados de representação do relevo e técnicas semi-automatizadas de sensoriamento remoto. A elaboração de mapas geomorfológicos com a utilização dessa abordagem cognitiva poderá contribuir significativamente para o incremento dos mesmos.

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICO-METODOLÓGICA

4.1 A Cartografia Geomorfológica

As duas principais correntes de pensamento que influenciaram a geomorfologia brasileira, segundo (ABREU, 2003), são aquelas de raiz germânica e de origem norte-americana. Na linhagem epistemológica alemã, a cartografia geomorfológica, desde o início foi um dos "*instrumentos fundamentais para o pesquisador, o qual tem na observação o centro de seu interesse.*" (ABREU, 2003). Tal fato pode ser verificado, por exemplo, pela marcante

incorporação de estudos russos e poloneses, cuja ótica estava estruturada segundo tais princípios.

A cartografia geomorfológica é extremamente importante para os estudos de geociências, bem como seu desenvolvimento teórico, conceitual e metodológico. É notória a ampla utilidade dos mapas geomorfológicos. No entanto, tanto os métodos quanto os procedimentos na elaboração destes produtos são bastante heterogêneos, variando em função do objetivo, escopo do trabalho e responsável pela sua elaboração.

KLIMASZEWSKI (1982) atribui o primeiro conceito de mapa geomorfológico à Passarge, que teria sido elaborado em 1914, sob a forma de um atlas morfológico, com a respectiva publicação descritiva datada de 1912. Desde então, diversas contribuições tem moldado o pensamento acerca da cartografia geomorfológica atual.

Ao longo do Século XX, foram realizadas algumas tentativas de sistematização de critérios base para os mapas geomorfológicos, ou seja, definição dos elementos essenciais de um documento dessa natureza: tais como escala mais apropriada e uniformização de legendas. Considerando que anteriormente tais iniciativas estavam limitadas à cobertura e disponibilidade de cartas topográficas, na atualidade, o avanço de técnicas de mapeamento do terreno contribui quantitativa e qualitativamente para a geomorfologia, principalmente, devido ao incremento na disponibilidade de informações dessa natureza.

COLTRINARI (2011) apresenta as principais contribuições entre 1950 e 1970, com destaque para os Congressos realizados pela União Geográfica Internacional (UGI). Em 1956, no Congresso Internacional de Geografia, realizado no Rio de Janeiro, foi apresentada uma ideia do que seria o conceito das cartas geomorfológicas de detalhe. Em 1960 a UGI criou a Comissão de Geomorfologia Aplicada e a Subcomissão de Cartografia Geomorfológica, com o objetivo de estabelecer regras para a execução dessas cartas e determina as práticas desejadas de mapeamento.

Durante a Conferência Internacional da UGI, realizada na Polônia em 1962, foram analisados mapas de 14 países e verificou-se a necessidade de melhor parametrização dada a diversidade de tipos diferentes de documentos cartográficos produzidos, definindo-se, assim, princípios para o que seria uma cartografia geomorfológica de detalhe, tais como a importância da interpretação de fotografias aéreas; variação da escala (entre 1:10.000 e 1:100.000), por ser considerada a faixa onde se pode representar as formas com mais eficácia; além das características imprescindíveis de um documento cartográfico dessa natureza: a Morfografia,

Morfometria, Morfogênese e Morfocronologia. Posteriormente, em 1972, seria editado o Manual de Cartografia Geomorfológica Detalhada por Demek, juntamente com as discussões estabelecidas pelo Congresso da UGI em Nova Delhi em 1968.

Apesar dos esforços feitos ao longo do Século XX, não existe, até hoje um método unificado internacional de mapeamento geomorfológico como ocorre com as cartas geológicas, fato explicado pela complexidade e variedade de objetos estudados ao redor da superfície do planeta, além da consequente dificuldade de classificá-los (FLORENZANO, 2008). Não é raro, que legendas elaboradas para mapas geomorfológicos de uma mesma área não sejam linearmente comparáveis, fato que se torna ainda mais evidente quando se consideram as diversas metodologias existentes, o modelo conceitual adotado, subjetividade e abordagem cognitiva do intérprete. Aos fatores enumerados, somam-se as dificuldades inerentes às diversas escalas, possivelmente, utilizadas na representação dos fatos geomorfológicos.

Apesar de tais especificidades, cabe destacar a importância da padronização nos procedimentos e métodos adotados em trabalhos de cunho científico. A seguir, alguns exemplos dentre as principais metodologias de mapeamento adotadas no mundo ocidental e consequentemente no Brasil.

A escola francesa utiliza a interpretação de fotografias aéreas para mapear os elementos do relevo com utilização de símbolos diversos, identificando os planos, rupturas de declive e curvas representam os fatos básicos na cartografia. O As cores indicam estrutura geológica, litologia e morfogênese atual e pretérita. Além dos elementos, o mapa representa depósitos superficiais, o sistema morfogenético a qual pertencem, a topografia e hidrografia.

Segundo QUEIROZ NETO (1978), as legendas adotadas para a elaboração dessas cartas geomorfológicas, derivam das proposições R.C.P. 77 do CNRS (TRICART, 1972), no qual cada táxon, ou unidade geomorfológica é definido conjuntamente por vários elementos: localização; contexto estrutural; contexto morfogenético; formações superficiais e características morfológicas das próprias formas. Apesar do aspecto carregado e de difícil leitura, esta metodologia é a que melhor representa os fenômenos geomorfológicos quanto à classificação poligênica (SALOMÉ & DORSSER, 1982).

Por sua vez, na metodologia/legenda do mapeamento detalhado da Polônia, publicado por KLIMASZEWSKI (1963), a característica é a divisão entre as áreas construtivas e destrutivas, representadas por diferentes cores, evidenciando grande preocupação dos autores quanto ao processo morfogenético. KLIMASZEWSKI (1982) ainda apresenta de maneira

detalhada os procedimentos, etapas e casos para demonstrar o valor científico e prático do mapa desenvolvido. Este produto é considerado como a consolidação das diversas diretrizes estabelecidas ao longo das reuniões da UGI.

A partir da década de 40, por iniciativa do *Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization* (CSIRO) da Austrália, foi desenvolvido o sistema de mapeamento baseado nos conceitos de *Land Unit* e *Land System*, criado como uma alternativa para os métodos da época e para viabilizar um levantamento de reconhecimento dos recursos do país. A ideia central consiste na identificação das características da topografia, solos e vegetação das áreas mapeadas, bem como sua inter-relação. A mudança de padrão determinaria os limites. (CHRISTIAN & STEWART, 1946).

O sistema desenvolvido pelo *International Institute of Aerial Survey and Earth Sciences* (ITC) foi apresentado por VERSTAPPEN & ZUIDAM (1975) no qual a interpretação de fotografias aéreas e imagens de satélite são procedimentos de grande importância, ademais, existe a possibilidade da abordagem multiescalar. As diferentes unidades geomorfológicas são representadas por cores, classificando formas de origem denudacional, fluvial e outras feições geomorfológicas menores. Cronologia e litologia são representadas por símbolos e como “pano de fundo”, utiliza-se o traçado da topografia e hidrografia. Os trabalhos de RODRIGUES (2009) e CAMARGO (2008) utilizam esta metodologia para elaborar mapas geomorfológicos por procedimentos de cartografia digital e geotecnologias.

Posteriormente, outras metodologias adotaram critérios de compartimentação e classificação baseados na identificação de padrões homogêneos de relevo, com destaque para RADAMBRASIL desenvolvido a partir da década de 70, IPT (1981), ROSS (1985, 1992, 1997) e IBGE (1995, 2009). Outro critério fundamental, nas metodologias citadas é a utilização de imagens de sensoriamento remoto, a sua aplicação em programas de mapeamento em vastas áreas e o caráter aplicado das pesquisas as quais estiveram vinculadas.

Para o presente experimento, optou-se pela adoção da metodologia e procedimentos definidos por ROSS (1985, 1992, 1997), que se baseia na compartimentação dos padrões de formas. A escolha foi motivada pela ampla aceitação e aplicação da metodologia no meio científico brasileiro, permitindo a comparação e a análise crítica por outros pesquisadores; além do fato de já ter sido adotada em projetos de mapeamento em pequena escala e grande abrangência territorial, fato convergente ao propósito desta dissertação. Outros critérios que

justificam esta opção foram: a facilidade de obtenção de mapas em meio digital para comparação e as possibilidades oferecidas pela abordagem multiescalar dos táxons.

Ross (1985) apresenta a primeira síntese conceitual de sua metodologia de classificação, com profundas influências da proposta metodológica do Projeto Radambrasil e baseado nas contribuições de AB' SÁBER (1949, 1964, 1969, 1970, 1971). A classificação se apropria dos conceitos de Morfoestrutura e Morfoescultura apresentados por MESCERJAKOV (1968), abrangendo todo o território nacional e procura estabelecer um balanço entre as feições estruturais do relevo, sem, contudo, desprestigiar a influência morfoclimática do modelado e sua macrocompartimentação. O autor destaca, ainda, a dificuldade na generalização da informação para classificação e compartimentação do relevo brasileiro. Tal implicação decorre da complexidade para o estabelecimento de critérios coerentes e que consigam abarcar todo o território nacional, que apresenta uma vasta diversidade de formas, substratos geológicos e processos e sistemas morfogenéticos.

Em 1992, foi publicado o artigo "O registro cartográfico dos fatos geomorfológicos e a questão da taxonomia do relevo", com maior detalhamento das concepções de níveis escalares para a compartimentação e classificação. Durante este período, a metodologia também recebeu contribuições materializadas em trabalhos acadêmicos e técnicos realizados pelo Brasil, sobretudo no estado de São Paulo, como observado em ROSS (1990).

A classificação de ROSS (1992) propõe seis níveis taxonômicos com base na morfologia e gênese:

- 1º Táxon: representado pela Morfoestrutura, que por sua vez é composta por grandes porções da crosta com características em comum quanto à estrutura, litologia, geotectônicas, idades e macro-morfologias. No âmbito deste estudo, trata-se do Cinturão Orogênico do Atlântico e Bacia Sedimentar do Paraná, representados por tons de lilás e verde, respectivamente.
- 2º Táxon: o conceito de Morfoescultura associa-se aos resultados de agentes climáticos presentes e passados, "são representadas pelo modelado ou morfologias ou tipologias de formas geradas sobre diferentes morfoestruturas através do desgaste erosivo promovido por ambientes climáticos diferenciados, tanto no tempo quanto no espaço." (ROSS & MOROZ, 1997). Estas unidades de mapeamento geomorfológico são representadas por diferentes tonalidades das cores utilizadas para indicar as Morfoestruturas.

- 3º Táxon: são as unidades morfológicas, padrão de formas semelhantes ou também tipos de relevo. Apresentam certa uniformidade das formas quanto à altimetria, dominância de inclinação das vertentes, morfologias de topos e vertentes, dimensão interfluvial, entalhamento dos vales, ou seja, quanto ao aspecto visual em imagens orbitais ou cartas clinográficas. No mapa, este táxon é representado por polígonos e seu respectivo índice de dissecação do relevo, que é indicado por uma combinação de letras e números. As letras indicam Denudação de topos convexos, aguçados e tabulares (Dc, Da e Dt, respectivamente) e os números são gerados pela combinação entre densidade de drenagem (ou dimensão interfluvial) e grau de entalhamento dos vales, sendo 11 o padrão menos dissecado e 55 o padrão mais dissecado. Os relevos de acumulação podem ser representados de acordo com a sua gênese fluvial, marítima, Intertidal ou ainda Terraços fluviais (Apf, Apm, Api e Atf, respectivamente).
- 4º Táxon: trata-se da forma individualizada dentro do padrão encontrado na unidade anterior. Trabalhos que adotam este táxon para mapeamento já são considerados de grande escala (mapa geomorfológico detalhado).
- 5º Táxon: corresponde aos diversos setores existentes na forma individualizada. Sejam as vertentes côncavas, convexas, retilíneas ou os topos.
- 6º Táxon: No que tange ao tamanho e abrangência, é a menor unidade espacial produzida pela dinâmica climática atual, podem também ser geradas pela ação antrópica. São feições produzidas ao longo da vertente, como ravinas, sulcos e voçorocas.

Além da discussão metodológica e técnica, ROSS (1992) também destaca o potencial para a utilização desses conceitos nos estudos socioambientais, preocupação emergente no contexto histórico da década de 90.

A publicação do Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo (ROSS & MOROZ, 1997) consolidou a metodologia e demonstrou o seu grande potencial de representação do relevo em escalas pequenas, mostrando-se como uma opção viável para a aplicação em projetos de planejamento regional que exijam o mapeamento de vastas áreas. Existem iniciativas institucionais semelhantes em outros estados, nos quais se utiliza essa metodologia, incluindo adaptações à realidade local. Destacam-se o Mapa Geomorfológico do Estado do Paraná, elaborado como fruto de um convênio entre a Universidade Federal do Paraná - UFPR e Minerais do Paraná - MINEROPAR em 2006; Projetos de mapeamento geomorfológico como

subsídio a planos de manejo de Unidades de Conservação, como Parque Estadual Intervales em 2006, elaborados pela Fundação Florestal do Estado de São Paulo, juntamente com a Universidade de São Paulo, além de projetos de auxílio à gestão territorial, como o Projeto Porto Seguro-Santa Cruz Cabrália e o Projeto Sistema de Informação Geoambiental de Cuiabá, Várzea Grande e Entorno, ambos gerenciados pelo Serviço Geológico Brasileiro - CPRM.

4.2 Interferometria SAR (InSAR) e Modelos Digitais de Elevação (MDE)

A diversidade de tipos de mapas geomorfológicos está condicionada não somente às metodologias existentes, mas também à utilização de técnicas distintas para a representação cartográfica da morfologia do terreno. Nas pesquisas envolvendo sensoriamento remoto, as fotografias aéreas, imagens de satélite e de radar podem subsidiar a interpretação visual, ou ainda servir como fontes de dados quantitativos. Na análise de imagens multiespectrais, essa segunda abordagem é bastante recorrente em diversas linhas de pesquisa, como visto nos trabalhos de KURIHARA et. al.(2000), MORATO et. al (2011), dentre muitos outros.

A tarefa de atribuir pesos às inúmeras variáveis em uma análise de fenômenos naturais e humanos é bastante difícil (GRANGER, 1994) e exige um alto grau de compreensão acerca dos fatos. No entanto, mesmo com eventual carga de subjetividade na mensuração, os métodos quantitativos contribuem para uniformização, verificação e experimentação nas pesquisas científicas. Dessa forma, para o sucesso de um trabalho dessa natureza, torna-se importante a compreensão dos princípios envolvidos na aquisição de dados, representação dos fenômenos e tratamento da informação.

O sistema sensor é idealizado para captar uma ou mais porções do espectro eletromagnético. Nesta dissertação, será dado destaque para a faixa do espectro eletromagnético denominada microondas, localizada entre as ondas de rádio e infravermelho e cujo comprimento varia aproximadamente entre 1 mm até 1 m, conforme ilustrado na figura a seguir:

Figura 4.1 – Espectroeletrômagnético com destaque para a faixa de microondas e a separação de bandas denominadas por letras. Fonte: Dutra (2003)

A faixa de microondas é dividida em bandas, identificadas por letras, conforme destacado na Figura 4.1. Os sensores que operam nessa faixa podem ser aerotransportados, acoplados a plataformas orbitais ou embarcações. São classificados pela categoria de ativos e passivos, sendo o primeiro referente àqueles capazes de emitir seus próprios pulsos de radiação, em oposição aos passivos dependem de fontes externas.

Os sensores passivos possuem aplicação em estudos de astronomia, oceanografia ou ainda meteorologia, dentre os quais se destaca o radiômetro de microondas, utilizado em medições da temperatura da superfície oceânica, salinidade, velocidade do vento, água líquida nas nuvens, dentre outras aplicações. Quanto aos ativos, o mais conhecido é o radar, acrônimo de *Radio Detection and Ranging* que foi desenvolvido inicialmente para detectar a presença de objetos e determinar sua distância e posição. Basicamente, o princípio de funcionamento consiste na emissão de pulsos de microondas na direção de interesse e reconhecimento da intensidade do eco ou refletância recebida dos objetos (LILLESAND et. al., 2008).

O radar pode, ou não, gerar imagens. Dentre os não imageadores, um dos mais conhecidos é o *Radar Doppler*, utilizado na medição de velocidade de objetos e o *Plan Position Indicator (PPI) System*, utilizado em controle de tráfego aéreo e navegação. É característico

pelo display com círculos concêntricos para indicar a posição dos ecos do radar. No grupo dos radares imageadores, destaque para os *Synthetic Aperture Radar (SAR) systems*.

Inicialmente, sistemas de radar geradores de imagens foram utilizados para fins militares, já que permitem a aquisição de informações mesmo em condições meteorológicas adversas ou durante a noite, independentemente da iluminação solar. Com a difusão dessa tecnologia, tais dados têm subsidiado levantamentos de recursos e gestão de desastres naturais, reconhecimento do terreno, dentre outras aplicações, sobretudo em ambientes tropicais (LILLESAND et. al, 2008).

De acordo com NOVO & PONZONI (2001), o sistema radar é composto por três funções básicas: transmissão de um pulso de microondas; recebimento da porção refletida desse pulso após interação com o alvo (retroespalhamento ou *backscatter*); e registro da potência, variação temporal e tempo de retorno do pulso retoespalhado. Os fatores que influenciam o sistema são, principalmente, as características do pulso (comprimento de onda e polarização), geometria do sistema radar em relação à superfície terrestre e a geometria local (alvo). Segundo NOVO (2008), os sensores imageadores registram a *variação espacial da energia eletromagnética resultante da interação com os objetos da superfície*.

No sistema de radar imageador, a dimensão na direção da linha de voo (*along track*) é denominada azimuth (*azimuth*) e a dimensão ortogonal, alcance (*range*). A região da imagem na qual inicialmente a frente de onda incide é o alcance próximo (*near range*), enquanto que a região mais afastada é o alcance distante (*far range*) (RODRIGUES, 2010). As imagens são produto do armazenamento da fase (*time delay*) e amplitude (*energy intensity*) dos ecos retroespalhados da superfície terrestre, considerando sua localidade, medida pelo tempo de retorno e alteração da frequência Doppler (SMITH, 2002). A figura a seguir ilustra a geometria do sistema SAR.

diferencial de cada *pixel* (TOUTIN & GRAY, 2000). A figura a seguir representa o método e grandezas envolvidas no processo de aquisição do par de imagens SAR para interferometria.

Figura 4.3 – Método InSAR para a obtenção de informação de elevação. A₁ e H são a posição e altura do satélite, respectivamente. R indica o componente *slant range* e h a elevação de um ponto P no nível do solo.
– Fonte: TOUTIN & GRAY (2000)

Para esta dissertação, foram utilizados modelos digitais de elevação (MDE) gerados por Interferometric SAR (InSAR) a partir dos dados coletados pelo *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). No intuito de minimizar eventuais conflitos conceituais, foi realizado um levantamento acerca da denominação desse tipo de dado.

O Modelo Numérico de Terreno (MNT) consiste numa representação quantitativa de uma grandeza que varia continuamente no espaço (CAMARA et. al., 2001). Esta definição, inicialmente, não destaca a técnica de representação, mas sim a natureza do conceito, podendo ser utilizada, portanto, de maneira abrangente. Segundo FELGUEIRAS (2001), o processo de geração de um MNT pode ser dividido em três etapas: amostragem, modelagem (quando ocorre sua estruturação interpolação) e aplicação propriamente dita. O autor destaca, também, que durante a segunda etapa pode se optar pela geração de modelos de grade regular ou irregular.

A seguir, GROHMANN (2008) descreve as diferenças conceituais entre estas duas categorias de representação.

"Grades Regulares: são estruturas mais simples, normalmente representadas por matrizes de valores de elevação, onde há localização (coordenadas) de um único ponto e o espaçamento da grade e sua orientação determinam a localização horizontal de todos os outros pontos (KUMLER, 1994). Este tipo de estrutura tornou-se conhecida como DEM (Digital Elevation Model), após o serviço geológico dos Estados Unidos (USGS) adotá-la como padrão de distribuição de dados de elevação.

Redes Triangulares Irregulares (Triangular Irregular Network - TIN): são estruturas em que pontos cotados irregularmente distribuídos são conectados por uma rede de arestas que formam triângulos não sobrepostos; os pontos são conectados geralmente de acordo com a triangulação de Delaunay, que une os centros de polígonos Thiessen vizinhos (THIESSEN, 1911; DELAUNAY, 1934; YAMAMOTO, 1988; KUMLER, 1994)".

Figura 4.4 - Representação dos modelos de elevação pelas técnicas de grade regular e *triangular irregular network*. Fonte: Grohmann (2008)

De forma grosseira, para aplicações em estudos de análise geoespacial, os MNT podem ser denominados como modelos digitais de terreno ou MDT¹, quando a referência de elevação adotada pela grade regular for o nível do solo, e modelos digitais de superfície ou MDS², quando o referencial for a cobertura vegetal ou outros objetos existentes na superfície

¹ *Digital Terrain Model* (DTM) na sua tradução para o inglês

² *Digital Surface Model* (DSM) na sua tradução para o inglês

mapeada. O MDT pode ser obtido por interpolação de curvas de nível originadas de mapeamentos sistemáticos ou sensores remotos, com frequências e polarizações que consigam penetrar pelo dossel, atingindo e captando as informações de altitude no nível do solo. Os MDS são gerados por sensores ou outros métodos que captam as informações de altitudes no nível das árvores ou outros anteparos.

Considerando o enquadramento dos dados SRTM como modelo de grade regular, optou-se pela utilização da denominação Modelo Digital de Elevação (MDE)³, para designar os modelos matriciais do SRTM, seguindo o mesmo padrão adotado por FARR et. al. (2007) e outras referências produzidas pelo *Jet Propulsion Laboratory* (JPL), centro vinculado à *National Aeronautics and Space Agency*.

Não foi encontrada uma classificação sistematizada dessas denominações que são, por muitas ocasiões, usadas de maneiras diversas, inclusive os casos de tradução para o inglês, tal fato foi verificado, por exemplo, em BARROS et. al. (2009); ALMEIDA et. al. (2003); BARBOSA et. al.(2011); BRUNCH et. al.(2009); ONGA et. al. (2010); BARBOSA et. al.(2012); LOBÃO & VALE (2006) e LOPES et. al. (2006); PINTO et. al. (2004). Outros autores como PIKE (2005) incluem, ainda, os modelos de *triangular irregular network* (TIN) na categoria de *digital elevation model* (DEM).

Outro fator que contribui para o enquadramento dos dados SRTM como MDE (e não como MDT) pode ser o fato de as bandas C e X, utilizadas na missão, não possuírem propriedades que permitam a aquisição de dados de elevação ao nível do solo, fenômeno denominado como “efeito dossel” por VALERIANO (2008) e descrito por PARADELLA (1993):

“No que se refere à interação e penetração da radiação no dossel, radares com frequência X (3,0 cm de comprimento de onda), fornecem medidas da interação energia/matéria ao nível do topo do dossel (canopy top scattering); radares em banda C (6 cm) já permitem interações da radiação do topo do dossel e principalmente do seu arranjo interior (canopy top and volume scattering), radares em frequência L (23 cm) terão respostas ligadas a interações da radiação do topo do dossel, e principalmente do seu interior e da superfície do terreno (canopy top, volume and surface scattering) e finalmente, radares na frequência P (68 cm) serão mais sensíveis a interações com os troncos e superfície do terreno (efeito double-bounce)” (PARADELLA, 1993)

³ *Digital Elevation Model* (DEM) na tradução para o inglês

A escolha pela faixa de comprimento de onda pelas Bandas C e X, em detrimento das outras, ocorreu em função do limite de velocidade do ônibus espacial e capacidade de carregamento do mesmo, considerando os fatores relacionados ao levantamento dos dados, conforme destaca FARR et. al. (2007):

“...an outboard C-band antenna would have less mass and volume, and was therefore obvious for a Shuttle mission that was already pushing the limits of the vehicle’s carrying capacity.” (FARR et al, 2007)

4.3 Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)

O SRTM foi um projeto desenvolvido pela NASA, juntamente com o NGA (*National Geospatial Intelligence Agency*), o DoD (*U.S. Department of Defense*) e as agências espaciais DLR (*Deutschen Zentrum für Luft – und Raumfahrt*) da Alemanha e ASI (*Agenzia Spaziale Italiana*) da Itália.

A bordo do ônibus espacial *Endeavour*, missão SRTM realizou seu voo entre 11 e 22 de fevereiro de 2000 coletando dados em *single-pass radar interferometry*, (os pares de imagens utilizados para geração do modelo foram coletados em uma única passada), cobrindo uma área de 119,51 milhões de km² por toda a superfície terrestre, incluindo praticamente todas as terras emersas entre as latitudes 60° N e 56° S, ou seja, em torno de 80% da superfície do planeta e 95% da população mundial. (LILLESAND et. al., 2008). A Figura 4.5 indica a abrangência de cobertura de dados coletados pelo projeto SRTM pelo Mundo. Verifica-se que as maiores áreas de exclusão são as altas latitudes e porções oceânicas do globo.

Figura 4.5 – Área de cobertura de dados da missão SRTM. Fonte: <http://radiomobile.pe1mew.nl/?Geodata:SRTM> acesso em 13 de março de 2013

A missão se apropriou do conhecimento acumulado durante os experimentos realizados pelo *Spaceborne Imaging Radar-C/X-Band Synthetic Aperture Radar* (SIR-C/X-SAR), programa realizado pela NASA, também em parceria com Alemanha e Itália, no qual os sensores dessas mesmas bandas foram acoplados aos satélites *Seasat* e *European Remote Sensing Satellite* (ERS) e mostraram a viabilidade de mapeamento de vastas áreas continentais coletando dados por *repeat-pass*, mas nunca possibilitaram a elaboração de um MDE a nível global. Assim, no SRTM, optou-se pela adoção da técnica *single-pass* que eliminaria a necessidade de estimação da geometria interferométrica dos dados por incertezas atmosféricas entre uma passada e outra (FARR et. al., 2007). Assim, os transmissores e receptores principais das bandas C e X foram posicionados no *Endeavour*, enquanto que as antenas secundárias (apenas para recepção) foram posicionadas na extremidade de um mastro retrátil 60 metros de comprimento, permitindo a aquisição dos dados de uma mesma área por *single-pass interferometry*. Os sensores da banda C eram de responsabilidade da NASA, enquanto que o da banda X, da DLR (FARR et. al., 2007). A Figura 4.6 representa esquematicamente a disposição dos equipamentos a bordo do *Endeavour*.

Figura 4.6 – Representação esquemática do *Endeavour* e disposição dos equipamentos. (KEYDEL, 2007)

A utilização desses modelos no estudo de geomorfologia é bastante difundida, sobretudo, pela ampla gama de possibilidades que oferece. Tais modelos podem subsidiar análises hidrológicas, extração de variáveis geomorfológicas, cálculos de diversas variáveis geoespaciais com precisão e rapidez, dentre outras aplicações. A Figura 4.7 mostra uma representação artística e ilustrativa da aquisição dos dados durante o voo do *Endeavour*.

Figura 4.7 – Visão artística em perspectiva da aquisição de dados pelo ônibus espacial *Endeavour* durante a missão SRTM. Fonte: <http://srtm.usgs.gov/index.php> acesso em 13 de março de 2013.

Os dados do SRTM são representados em modelos de grade regular, disponibilizados em *tiles* de 1° X 1°, com células (*pixels*) de 1 arcsecond (aproximadamente 30m) para toda a extensão dos Estados Unidos e territórios. Para as outras partes do Mundo houve uma degradação do dado original coletado, que é distribuído, também com *tiles* de 1° X 1°, mas com pixels de 3 arcseconds (cerca de 90m).

Na versão 1.0, os dados distribuídos pelo USGS eram gerados pela média dos valores originais de 30m, ou seja, por *averaging method*; ao passo que os dados distribuídos diretamente pela NASA, eram gerados por *sampling method*, representando o valor central de aquisição na janela 3X3 de um pixel de 90m de resolução, ou seja, apresenta a informação original. (GROHMANN, 2008).

Figura 4.8 – Diferentes procedimentos de reamostragem do SRTM adotados pela NASA (dado coletado) e pelo USGS (média obtida para cada célula de 1 arcsec) para a geração de modelos com resolução espacial de 90m. (GROHMANN, 2008)

Atualmente, há diversas versões disponíveis para estes dados, pois os modelos iniciais foram reprocessados por instituições ao redor do globo e algumas falhas oriundas da fase de aquisição foram corrigidas. A versão mais recente é distribuída pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) na versão 3, lançada em 2013 e disponível na página eletrônica da *Nasa's Earth Observing System Data and Information System* (<http://earthdata.nasa.gov>). Para esta versão, são disponibilizadas, novamente, as duas versões de processamento de dados: *Sampling Method* e *Averaging Method*, conforme representado na figura abaixo. Maiores detalhes sobre a escolha do método de reamostragem de dados SRTM utilizados nesta dissertação encontra-se no capítulo 6.2.2.6.

O produto final possui precisão vertical global de ± 16 m e horizontal ± 20 m (RABUS et.al., 2003). RODRIGUEZ et. al. (2006) verificou que, para a América do Sul, esta precisão é de 6,2m na vertical e 9,0m na horizontal. No entanto, considerando o fato de se tratar de um

levantamento em escala global, resta claro que os dados gerados pelo SRTM são de grande validade para mapeamentos. Verifica-se na literatura possibilidades efetivas de uso destes dados para estudos de caráter espacial, como hidrologia (WOLF, 2009); Geomorfologia (VALERIANO, 2005) e (MIRANDA, 2005); Geologia Estrutural (ABARCA, 2006), entre outros.

Nos dias atuais, existem dados com potencial para geração de modelos com melhor resolução espacial, como aqueles fornecidos pelo ASTER, um sensor ótico acoplado ao satélite TERRA e que opera na banda do infravermelho próximo, gerando MDE de $\approx 30\text{m}$ de resolução espacial. Outra alternativa aos dados SRTM seriam aqueles obtidos por Lidar, que apresentam alto grau de precisão, acurácia e alto grau de fidelidade de formas naturais e antrópicas. Seu processamento, no entanto, exige alto desempenho das estações de trabalho, além de se tratar de uma tecnologia de custo elevado, tornando-se, eventualmente, pouco acessível para toda a comunidade científica.

RODRIGUES (2010) apresenta alguns parâmetros e condicionantes específicos para a verificação da precisão dos dados de SRTM, bem como a viabilidade de sua utilização de acordo com as premissas do Sistema Cartográfico Brasileiro. O autor encontrou valores que apontam acurácia vertical compatível com classe A do Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) em escalas de 1:100.000 para a região da Serra dos Carajás, PA. Outro trabalho que verifica a compatibilidade dos dados SRTM com cartas topográficas em escala de 1:100.000 foi apresentado por BIAS et. al. (2010).

Seguindo nesta linha, para este trabalho serão adotadas as diretrizes estabelecidas pelo PEC, definidas pelo Decreto nº 89.817 de 20 de junho de 1984, que estabelece critérios de precisão para documentos cartográficos. Segundo trabalhos realizados por LEAL (2007) e SANTOS et. al (2010), o advento da cartografia digital gerou a necessidade de atualização de alguns dos parâmetros do PEC, no entanto, este ainda é considerado um instrumento útil para verificação de precisões, além do fato de ser um critério objetivo e oficial, o que contribui com os objetivos propostos por esta dissertação.

4.4 Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC)

O mapeamento sistemático realizado pelo território brasileiro na escala 1:100.000 cobre apenas 75,39% do território, restando ainda, grandes vazios cartográficos (MARTINS, 2010). As informações que geraram a maior parte das bases cartográficas disponíveis são oriundas de restituição de fotografias aéreas de levantamentos realizados entre as décadas de 60 e 80.

Os MDE, como SRTM e ASTER, por se tratarem de levantamentos realizados em escala global e com uma mesma técnica de aquisição de informações, podem servir como alternativa, sobretudo para as áreas onde o levantamento oficial brasileiro é inexistente. Para tanto, é necessário conhecer as limitações e potencialidades de tais modelos. Dentre os trabalhos que avaliam a acurácia desses dados, destacam-se BARROS & CRUZ (2007); SANTOS et.al. (2006); HALL et.al. (2005); VALERIANO (2004) e RODRIGUEZ (2006).

O Decreto nº 89.817 de 20 de junho de 1984 estabelece as instruções reguladoras das normas técnicas da cartografia nacional. Os dois primeiros capítulos tratam dos propósitos e parâmetros utilizados na avaliação da exatidão dos documentos cartográficos. Segue abaixo, a transcrição do Art. 8º do decreto, que trata, especificamente, dos critérios para avaliação dessa exatidão.

Art. 8º - As cartas quanto à sua exatidão devem obedecer ao Padrão de Exatidão Cartográfica - PEC, seguinte o critério abaixo indicado:

1. Noventa por cento dos pontos bem definidos numa carta, quando testados no terreno, não deverão apresentar erro superior ao Padrão de Exatidão Cartográfica - Planimétrico - estabelecido.

2. Noventa por cento dos pontos isolados de altitude, obtidos por interpolação de curvas de nível, quando testados no terreno, não deverão apresentar erro superior ao Padrão de Exatidão Cartográfica - Altimétrico - estabelecido,

§ 1º - Padrão de Exatidão Cartográfica é um indicador estatístico de dispersão, relativo a 90% de probabilidade, que define a exatidão de trabalhos cartográficos.

§ 2º - A probabilidade de 90% corresponde a 1,6449 vezes o Erro-Padrão - PEC = 1,6449 EP.

§ 3º - O Erro-Padrão isolado num trabalho cartográfico, não ultrapassará 60,8% do Padrão de Exatidão Cartográfica.

§ 4º - Para efeito das presentes Instruções, consideram-se equivalentes as expressões Erro-Padrão, Desvio-Padrão e Erro-Médio-Quadrático.

Posteriormente ao estabelecimento dos critérios de avaliação, o decreto hierarquiza os níveis de exatidão planimétrica e altimétrica esperadas para os documentos cartográficos produzidos, conforme segue transcrito:

Art 9º - As cartas, segundo sua exatidão, são classificadas nas Classes A, B e C, segundo os critérios seguintes:

a - Classe A

1 - Padrão de Exatidão Cartográfica - Planimétrico: 0,5 mm, na escala da carta, sendo de 0,3 mm na escala da carta o Erro-Padrão correspondente.

2 - Padrão de Exatidão Cartográfica - Altimétrico: metade da equidistância entre as curvas-de-nível, sendo de um terço desta equidistância o Erro-Padrão correspondente.

b - Classe B

1 - Padrão de Exatidão Cartográfica - Planimétrico: 0,8 mm na escala, da carta, sendo de 0,5 mm na escala da carta o Erro-Padrão correspondente

2 - Padrão de Exatidão Cartográfica - Altimétrico: três quintos da equidistância entre as curvas-de-nível, sendo de dois quintos o Erro-Padrão correspondente.

c - Classe C

1 - Padrão de Exatidão Cartográfica - Planimétrico: 1,0 mm na escala da carta, sendo de 0,6 mm na escala da carta o Erro-Padrão correspondente.

2 - Padrão de Exatidão Cartográfica - Altimétrico: três quartos da equidistância entre as curvas-de-nível, sendo de metade desta equidistância o Erro-Padrão correspondente.

Art 10 - É obrigatória a indicação da Classe no rodapé da folha, ficando o produtor responsável pela fidelidade da classificação.

§ Único - Os documentos cartográficos, não enquadrados nas classes especificadas no artigo anterior, devem conter no rodapé da folha a indicação obrigatória do Erro-Padrão verificado no processo de elaboração.

Art 11 - Nenhuma folha de carta será produzida a partir da ampliação de qualquer documento cartográfico.

§ 1º - Excepcionalmente, quando isso se tornar absolutamente necessário, tal fato deverá constar explicitamente em cláusula contratual no termo de compromisso;

§ 2º - Uma carta nas condições deste artigo será sempre classificada com exatidão inferior à do original, devendo constar obrigatoriamente no rodapé a indicação: "Carta ampliada, a partir de (... documento cartográfico) em escala (... tal)".

§ 3º - Não terá validade legal para fins de regularização fundiária ou de propriedade imóvel, a carta de que trata o " caput " do presente artigo.

Por fim, o decreto estabelece os elementos obrigatórios de uma carta (Capítulo III), bem como as diretrizes do Sistema Geodésico Brasileiro, texto revogado, posteriormente, pelo Decreto nº 5.334 de 2005.

As tecnologias atuais permitem a realização de experimentos confiáveis para a avaliação prevista pelo Decreto 89.817 de 20 de junho de 1984. O uso de receptores *Global Navigation Satellite System* (GNSS) permite a aquisição de dados planimétricos e altimétricos com relativa rapidez, precisão e acurácia. Associado à Rede Brasileira de Monitoramento contínuo (RBMC), tais dados podem fornecer parâmetros para a avaliação de cartas, mapas e modelos digitais de elevação. MARTINS (2010) verificou a diferença entre a elevação dos dados fornecidos pelo SRTM, em comparação com altimetrias obtidas por receptores GNSS, concluindo que, para a escala 1:100.000, o SRTM atinge o Padrão A de exatidão cartográfica e Padrão C para a escala de 1:50.000. Esta compatibilidade já fora verificada anteriormente por BARROS & CRUZ (2007) para município de Bananal, na divisa dos estados de São Paulo e Rio de Janeiro.

Desta forma, conclui-se que os dados obtidos pelo SRTM apresentam a acurácia necessária para os experimentos desta dissertação já que os produtos de sua análise tendem a ser compatíveis aos de uma carta topográfica elaborada pelos métodos tradicionais da cartografia sistemática. Ademais, considerando que a representação do produto final desta dissertação ocorreu numa escala menor (1:500.000) entende-se que os dados são adequados, tanto para a escala de trabalho, quanto para a representação.

4.5 Princípios de interpretação visual em geociências

De forma geral, há uma concordância acerca da subjetividade de muitos dos procedimentos envolvidos na interpretação de imagens de sensoriamento remoto e cartografia sistemática, sendo que o resultado do produto final depende do objetivo do trabalho, método

adotado, além da habilidade e bagagem conceitual do interprete. O procedimento interpretativo, no entanto, é permeado por sequências metodológicas, imprescindíveis para a o desenvolvimento adequado de um estudo científico.

Segundo NOVO (2008), a interpretação visual se baseia em sete características de imagem no processo de extração de informações. A análise de tais elementos, por parte do intérprete, subsidia a elaboração de Chaves de Interpretação, um método que busca a diminuição da subjetividade no processo de classificação da imagem. O quadro a seguir representa a definição dos principais elementos componentes de uma Chave de Interpretação:

Elementos para a elaboração de Chaves de Interpretação	
Elemento	Definição
Tonalidade / Cor	Representa o registro da radiação que foi refletida ou emitida pelos objetos da superfície. Tonalidades claras estão associadas a área de elevado retroespalhamento em sensores ativos de microondas, ou ainda elevadas altitudes no caso de MDE.
Textura	A textura da imagem representa a frequência de mudanças tonais por unidade de área dentro de uma dada região. A textura da imagem depende da resolução espacial do sistema, do processo de imageamento e da escala da imagem utilizada.
Padrão	O padrão define o arranjo espacial dos objetos na cena. O significado do padrão também depende do tipo de imagens analisadas, de sua escala e sua resolução espacial.
Localização	Representa a posição relativa do objeto ou feição dentro da cena.
Forma	Representa a configuração espacial do objeto. Pode ser observada em três dimensões caso seja possível utilizar o recurso de estereoscopia.
Sombra	Pode ser utilizada como fonte de informação sobre limites de unidades geológicas, dimensões relativas de escarpas, árvores. O significado da sombra também é afetado pelo tipo de sensor utilizado, pela resolução espacial e escala da imagem.
Tamanho	É a função da resolução do sistema e da escala das imagens. O tamanho do objeto interfere diretamente na sua identificação.

Quadro 4.1 – Elementos utilizados na elaboração de chaves de interpretação – Fonte: Adaptado de NOVO (2008)

Especificamente sobre a interpretação visual para a cartografia geomorfológica, HAYDEN (1986) define que a representação cartográfica das unidades geomorfológicas pode ocorrer em duas abordagens: (i) modelo de padrões de relevo (*landform patterns model*) e (ii)

modelo de elementos de relevo (*landform elements model*). No primeiro, a superfície terrestre é vista como um fenômeno tridimensional repetitivo, no qual as unidades elementares ocorrem em intervalos quase regulares e em padrões definidos (representações em áreas). No segundo, a paisagem é separada em elementos geométricos de acordo com a escala (representações lineares).

Outra abordagem que merece destaque é aquela proposta por DEMEK (1967), na qual são definidos níveis de análise utilizados no processo de generalização de mapas geomorfológicos. São definidas três unidades taxonômicas, conforme transcrito:

Superfícies Geneticamente Homogêneas: *A menor unidade taxonômica é a Superfície Geneticamente Homogênea. Por este termo, entendemos uma área plana geometricamente simples, sem uma ruptura distinta de declividade, geralmente com tamanho de dezenas de metros quadrados até alguns quilômetros quadrados (A.I. YERMOLOV, 1958, 1964). A Superfície Geneticamente Homogênea é resultado de um processo geomorfológico ou de um complexo de processos atuando em uma certa direção. Durante esta atividade, surge uma superfície em uma outra posição no espaço antes ocupado pela área plana recente. A origem de superfícies geneticamente homogêneas é condicionada por três tipos de processos: processos endógenos, processos exógenos (divididos em processos de erosão-denudação e processos de acumulação) e processos antrópicos; correspondem normalmente a estágios mais breves no desenvolvimento do relevo. Encontram-se limitadas principalmente por bordas e rupturas de declividade, ocasionadas pela mudança na direção dos processo mencionados. (DEMEK, 1967)*

Formas de Relevo: *As superfícies geneticamente homogêneas criam as formas do relevo. Estas surgem em função dos mesmos processos, mas normalmente correspondem a estágios mais longos no desenvolvimento do relevo. Suas dimensões variam bastante, de centenas de metros quadrados a centenas de quilômetros quadrados. Um exemplo simples é o terraço fluvial de acumulação, formado por uma superfície de acumulação geneticamente homogênea formando a escarpa do terraço. Ambas superfícies estão separadas por uma borda mais ou menos distinta. (DEMEK, 1967)*

Tipos de Relevo: *As formas compõem então o Tipo de Relevo. Entendemos, por Tipo de Relevo, um complexo de formas em uma área com delimitação mais ou*

menos precisa, destacada pela mesma elevação absoluta e a mesma gênese, baseada na mesma morfoestrutura, mesmos complexos de agentes morfogenéticos e a mesma história de desenvolvimento. A origem do relevo corresponde a estágios prolongados no desenvolvimento da superfície da Terra. Diferentemente das unidades taxonômicas anteriores, o Tipo de Relevo não é mais uma unidade concreta, mas uma unidade abstrata estabelecida de forma dedutiva. (DEMEK, 1967)

Na metodologia de mapeamento geomorfológico utilizado em ROSS & MOROZ (1997), o procedimento de interpretação dos padrões de formas semelhantes (3º Táxon) é realizado a partir do agrupamento visual dos Tipos de Relevo (DEMEK, 1967). O 1º Táxon, correspondente às Morfoestruturas, que são delimitadas de acordo com as grandes estruturas geológicas, tendendo a apresentar um padrão de relevo particular, quando comparada à outra. As Morfoesculturas (2º Táxon) representam conjuntos de padrões de formas, que guardam entre si certo grau de semelhança quanto à dissecação do relevo (tamanho da forma, entalhamento dos vales, declividade das vertentes, densidade de drenagem).

Assim, para esta dissertação, a partir do traçado dos Tipos de Relevo (DEMEK, 1967), interpretados e mapeados visualmente por ROSS & MOROZ (1997) procedeu-se com a identificação das Chaves de Interpretação, que posteriormente, foram convertidas em atributos da rede semântica de modo a representar o conhecimento humano na GEOBIA. Esta conversão foi realizada a partir das unidades mapeadas, variáveis geomorfométricas geradas em Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e conhecimento de campo, conforme descrito pormenorizadamente no capítulo 6.2.2.

4.6 Abordagem quantitativa para análise de dados espaciais a partir de variáveis geomorfométricas

Uma das grandes utilidades de MDE é a possibilidade de derivação dos dados de elevação para outras variáveis geomorfométricas. Além da possibilidade de utilização dessas técnicas para interpretação visual, no contexto de classificação por GEOBIA, são informações importantes para a elaboração de um modelo cognitivo pela análise quantitativa, tanto na etapa de segmentação ou de elaboração de uma rede semântica.

Shary et al (2002) apresentam uma possível categorização de variáveis geomorfométricas (VG) constituída por quatro classes: A, B, C e D. A classificação abaixo indica as

Variáveis Geomorfométricas	Locais	Regionais
Campo Específico	A	B
Campo Invariante	C	D

Quadro 4.2 – Classes de variáveis geomorfométricas.Fonte: Shary et al (2002)

As variáveis de campo específico (*field-specific*) estão associadas com grandezas físicas geofísicas vetoriais, como gravidade e irradiação solar, ao passo que aquelas de campo invariante (*field-invariant*), não possuem relação com essas grandezas, apenas caracterizam geometricamente uma superfície. Variáveis locais são aquelas obtidas de operações de vizinhança com janelas móveis (filtros) de tamanhos pré-estabelecidos, sendo apropriadas para delinear formas da superfície. As VG regionais utilizam janelas móveis flexíveis cujas dimensões são alteradas durante a busca de feições geomorfométricas. O tamanho do filtro não é definido, dependendo, portanto, de especificidades do terreno.

VALERIANO (2008) apresenta diversas possibilidades de derivação e utilização dessas variáveis morfométricas, a partir de dados SRTM, para estudos diversos em geomorfologia e hidrologia. FERNANDES (2013) utilizou VG Locais de campo específico, como Declividade, Curvatura Horizontal, Curvatura Vertical e Orientação de Vertente para elaboração de mapas geomorfológicos a partir de segmentação multirresolução e mineração de dados.

No âmbito deste trabalho, além da elevação, a declividade foi utilizada como variável do modelo cognitivo, sendo definida como o ângulo de inclinação da superfície local em relação ao plano horizontal, podendo ser expressa em graus ou porcentagem (VALERIANO, 2008), podendo também pode ser denominada clinografia (DE BIASI, 1992).

Outra variável utilizada nos experimentos foi o Relevo Sombreado, cujo produto foi considerado semelhante, quanto ao aspecto visual, às imagens geradas pelo Projeto Radam-D. Esta não é considerada uma VG, mas sim uma variável textural e não compôs a base de dados da segmentação multirresolução, restringindo-se, apenas, à comparação visual.

4.7 Análise Orientada a Objetos Geográficos (GEOBIA)

Segundo BLASCHKE & STROBL (2001) até o final do século XX, as técnicas de análise de imagens predominantes baseavam-se na estatística dos *pixels*. Gradativamente, iniciou-se, na comunidade científica, o debate acerca da utilização do padrão espacial de imagens como unidade de análise. Para tanto, as imagens de alta resolução espacial contribuíram de forma significativa para o desenvolvimento desta abordagem.

Nessa linha, BLASCHKE et al. (2007) apresentam aspectos considerados de grande importância no desenvolvimento técnico e metodológico nos trabalhos recentes de SIG e SR: o aprimoramento dos sensores acoplados aos satélites; e também a necessidade de novas concepções metodológicas para classificação de imagens de alta resolução, já que muitos dos novos sensores possuem alta resolução espacial. Assim, conforme destacam os autores, a utilização dos chamados “objetos homogêneos”, obtidos por procedimentos de segmentação de imagens, permitem análises que exacerbam o comportamento espectral, limitada à esfera estatística, e avançam para uma abordagem que valoriza a dimensão espacial da informação.

“No processamento digital de dados de sensoriamento remoto está ocorrendo uma grande revolução. Ao invés de classificar os pixels individualmente quanto às suas características espectrais, os novos procedimentos consideram a delimitação de objetos homogêneos como a base para o processamento posterior. São apresentados procedimentos que segmentam os dados de satélite e, a partir das características relevantes desses elementos em relação ao comportamento espectral, textura, forma e informação contextual, elaboram-se associações, por exemplo, com classes de uso do solo.” (BLASCHKE et. al., 2007)

Até os primeiros anos do século XXI, a função principal da segmentação de imagens era produzir regiões (ou segmentos) não sobrepostas que subsidiariam o processo de classificação, oriundos da divisão, da imagem, em grupos de pixels relativamente homogêneos e significantes, no ponto de vista semântico (BLASCHKE, 2010).

Com o conceito de Object-based Image Analysis (OBIA), surgiu uma abordagem na qual o procedimento de segmentação produz objetos (segmentos) que permite a extração de informações geoespaciais, utilizadas para guiar a classificação e a modelagem de processos (BLASCHKE, 2013). Isto pode ocorrer a partir de dados oriundos de SIG, ou informações contidas na própria imagem e seus constituintes. BENZ et al (2004) afirmam que a análise é iniciada com base nos dados (*pixels*), tornando-se mais subjetiva, em função da estruturação e reprodução do conhecimento sobre a imagem. Apesar disso, a sequência de procedimentos, envolvendo segmentação multirresolução e classificação, permite que os resultados sejam novamente testados com relativa rapidez.

Segundo CAMARGO (2008), o objeto é composto por estrutura (atributos) e comportamento (operações) dos dados em uma única entidade. As principais características

dos objetos são: (i) identidade, (ii) classificação, (iii) polimorfismo e (iv) herança (RUMBAUGH et al., 1994).

“Identidade representa a subdivisão dos dados em entidades discretas e distintas, denominadas de objetos. Classificação é o ato de agrupar objetos com a mesma estrutura de dados e com o mesmo comportamento. Cada objeto é uma instância de uma classe. Polimorfismo consiste na capacidade de operações atuarem de modos diversos em classes diferentes. Finalmente, herança é o compartilhamento de atributos e operações entre classes com base em um relacionamento hierárquico. Uma classe pode ser definida de forma abrangente e depois refinada em sucessivas subclasses mais detalhadas. Cada subclasse incorpora, ou herda, todas as propriedades de sua superclasse e acrescenta suas próprias e exclusivas características. As propriedades da superclasse não precisam ser repetidas em cada subclasse” (RUMBAUGH et al., 1994 apud CAMARGO, 2008).

A OBIA incorpora o conhecimento humano em uma vasta gama de disciplinas que a geração e uso de informações geoespaciais, e por isso é, por vezes, também conhecida como Geographic Object-based Image Analysis (GEOBIA). Essa diferenciação se torna necessária por conta da existência de trabalhos com a utilização da análise orientada a objeto com imagens médicas e outros nos quais o conceito está ligado puramente à tecnologia de informação. Dentre as principais plataformas (*softwares*) que apresentam as especificações técnicas para GEOBIA são: eCognition, Envi Feature Extraction e InterIMAGE.

4.8 Segmentação Multirresolução

Segundo BLASCHKE (2010) segmentos são regiões geradas por um ou mais critérios de homogeneidade e em uma ou mais dimensões. O algoritmo de segmentação multirresolução do software eCognition baseia-se no crescimento de regiões, no qual cada pixel forma um segmento (ou região) da imagem, baseando-se na definição de homogeneidade das informações espectrais e espaciais, combinada com técnicas de otimização local e global (BAATZ & SCHÄPE, 2000). Os objetos podem ser gerado a partir de uma ou várias imagens, sendo definidos por três parâmetros: Escala, que é uma medida de heterogeneidade referente ao tamanho dos objetos, quanto maior seu valor, maior serão os objetos criados; (ii) Forma (Shape), que define o peso da forma na segmentação, assim, um valor baixo implica no maior peso no uso da cor, que é baseada nas características espectrais (ou valores de pixels) a imagem; e (iii) Compacidade (Compactness), que compõe o critério de forma junto com a

Suavidade, e define o peso do critério de compacidade dos objetos, por exemplo, um valor baixo cria objetos mais alongados e com bordas suaves, enquanto um valor alto implica em objetos mais compactos e menores (BAATZ & SCHÄPE, 2000). Vale lembrar que a adaptação desses critérios irá depender da aplicação e da natureza das imagens.

Segundo DRAGUT & BLASCHKE (2006), neste algoritmo de segmentação, o parâmetro de escala (scale parameter) é uma medida da mudança máxima no total da heterogeneidade que pode ocorrer quando dois objetos são fundidos entre si num processo gradativo. Internamente, este valor

Segundo HAAP (2010), o grau de compacidade (*compactness*) é definido como a distância entre o perímetro do segmento. Quanto maior o valor do parâmetro shape, mais dependente o objeto será da forma, ao passo que quanto menor, mais dependente o tom do pixel será o objeto da segmentação. Quanto maior o valor do parâmetro *compactness*, mais circular tende a ser o objeto. Por outro lado, quanto menor esse parâmetro, mais próximo, o objeto será da forma quadrada. O parâmetro oposto de *compactness* (compacidade) é o *smoothness* (suavidade).

DRAGUT & BLASCHKE (2006) demonstram a possibilidade de aplicação do algoritmo de segmentação multirresolução para áreas distintas entre si, gerando resultados coerentes do ponto de vista da análise geomorfológica. A aplicação do algoritmo de segmentação multirresolução desta dissertação seguiu a mesma lógica operacional de ASSELEN & SEIJMONSBERGEN (2006); CAMARGO (2008); FERNANDES (2013), que utilizam a técnica de segmentação multirresolução para compartimentar o relevo, a partir de modelos digitais de elevação, de acordo com sua homogeneidade e posteriormente, utilizam a GEOBIA para a classificação geomorfológica.

ANDERS & SEIJMONSBERGEN (2011) propõem procedimentos para refinamento dos resultados do algoritmo de segmentação multirresolução, no entanto, não foi possível adotar tais proposições para esta dissertação. Tal fato torna-se menos relevante quando considerada a escala de análise e mapeamento dos produtos cartográficos desta dissertação.

4.9 Rede Semântica Hierárquica e Logica Fuzzy

Segundo BENZ et al (2004), enquanto a relação topológica entre pixels adjacentes é dada implicitamente pelo *raster*, a topologia e interação de objetos adjacentes é tratada de modo a estabelecer as relações de vizinhança e, conseqüentemente, possibilitando a geração

dos diversos tipos de informação. Podem ser explorados os atributos espectrais, de textura, forma e de relações topológicas dos objetos (NOVACK, 2009).

A rede semântica é um formalismo de representação do conhecimento de um especialista em forma de uma cadeia hierárquica composta por nós e arcos, ou seja, conceitos e relações, respectivamente (BITTENCOURT, 2006). Para ALMEIDA (2010) a abordagem de análise orientada a objetos pressupõe a utilização de redes semânticas e múltiplos níveis de classificação interligados, que são utilizados para simular o conhecimento de um intérprete humano. Quando objetos de diferentes escalas estão conectados em uma mesma localização, a rede semântica torna-se uma rede semântica e hierárquica. Assim, cada objeto passa a ser caracterizado não somente por seus atributos espectrais, de forma, ou de textura, mas também por seus vizinhos e objetos de níveis superiores e inferiores (BENZ et al, 2004).

A rede semântica e hierárquica é elaborada em função do conhecimento de um especialista, com o propósito de classificar os objetos oriundos da segmentação. A rede pode ser estruturada a partir de regras de classificação com limiares rígidos ou por funções de pertinência fuzzy.

Segundo BENZ et al (2004), a lógica fuzzy (também chamada de lógica nebulosa) é uma lógica multivariada para quantificar a incerteza. O conceito básico é a atribuição de valores contínuos de 0 (falso) até 1 (verdadeiro) para cada uma das funções de pertinência utilizadas para classificação de objetos, tornando possível, assim, a modelagem da imprecisão do pensamento humano. O sistema fuzzy é composto por três passos principais segundo BENZ et al, (2004):

- *Fuzzification*: no qual se descreve a transição de um limiar rígido para um sistema *fuzzy*
- Combinação de Conjuntos *fuzzy*, que são obtidos por funções que definem, para cada objeto de um conjunto X, seus respectivos graus de pertinência.
- *Defuzzification*: que consiste na etapa de estabelecimento de um limite rígido no mapa para as classes definidas pelas funções de pertinência.

Dentre os trabalhos que utilizam lógica fuzzy no âmbito da GEOBIA, para mapeamento geomorfológicos, destacam-se os trabalhos desenvolvidos por CAMARGO (2008); CAMARGO et al (2012); FERNANDES (2013).

4.10 Avaliação de Classificação – Acurácia Global e Matriz de Erros

Para avaliação da confiabilidade temática da classificação, faz-se necessário definir os conceitos de exatidão, precisão e acurácia. Segundo ANTUNES & LINGNAU (1997) a falta de exatidão de observações são geralmente oriundas de erros sistemáticos e tendem a se acumular num mesmo sentido; a acurácia seria expressa pelo desvio padrão da amostra em relação ao valor real; por fim, a precisão consiste no desvio padrão de uma amostra em relação à sua média.

A inspeção visual é um primeiro nível de avaliação de resultados de uma classificação. Em complementação, pode-se utilizar técnicas quantitativas de verificação, como a matriz de erro proposta por CONGALTON (1991), que permite a obtenção de diversas medidas de acurácia. Trata-se de uma matriz quadrada que representa o número de amostras atribuídas a uma categoria específica em relação às classes de referência (CONGALTON, 2001). As linhas indicam as informações classificadas, ao passo que as colunas os dados de referência.

Na tabela abaixo, é possível observar um exemplo de matriz de erro elaborada para uma área classificada em áreas de vegetação, área urbana e água. A diagonal principal da matriz representa o número de amostras corretamente classificadas e acurácia global pode ser calculada pela divisão entre a soma da diagonal principal e o número total de amostras.

A porcentagem de acurácia do produtor representa o desempenho da classificação, ao passo que a acurácia do usuário indicam a probabilidade de acerto por parte dos dados classificados. Além da comparação entre as classes, apresenta informações acerca dos erros de comissão (inclusão) e erros de omissão (exclusão). CONGALTON (2001)

		Reference Data			row total	Land Cover Categories
		V	W	U		
Classified Data	V	43	10	6	59	V = Vegetation
	W	3	23	5	31	W = Water
	U	2	1	30	33	U = Urban
column total		48	34	41	123	OVERALL ACCURACY = 96/123 = 78%

PRODUCER'S ACCURACY		USER'S ACCURACY	
V	= 43/48 = 90%	V	= 43/59 = 73%
W	= 23/34 = 68%	W	= 23/31 = 74%
U	= 30/41 = 73%	U	= 30/33 = 91%

Quadro 4.3 – Exemplo de Matriz de Erro (CONGALTON, 2001)

A seleção do tamanho da amostragem é tão importante quanto a elaboração da matriz em si. CONGALTON & GREEN (1999) estimam uma medida considerada razoável seria a seleção de 50 amostras por classe, no entanto, este número varia em função do tamanho da área e importância relativa de cada classe. Dentre os métodos apresentados, CONGALTON (2001) destaca métodos que combinam amostragem sistemática com a aleatória, que tende a apresentar resultados válidos estatisticamente e consistentes em aplicações práticas.

5 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada aproximadamente no centro do estado de São Paulo, numa faixa de transição entre a região oeste do Planalto Atlântico e leste da Depressão Periférica Paulista, sendo limitada pelas coordenadas 22°45'S e 47° 15'W (extremo sudoeste) e 22°30'S 46° 35'W (extremo nordeste), como exposto na Figura 5.1. Foi selecionada, portanto, uma região entre o Cinturão Orogênico do Atlântico e a Bacia Sedimentar do Paraná, regionalmente representados pelo Planalto Serra Negra / Lindóia, Planalto de Jundiá e a Depressão do Médio Tietê. O acesso à área se dá por diversas rodovias estaduais, federais e

vicinais, dentre as quais, destacam-se a SP- 330 (Rodovia Anhanguera) e BR-381 (Rodovia Fernão Dias).

Figura 5.1 – Mapa de localização da área de estudo

A escolha da área foi feita levando-se em consideração principalmente as potencialidades e limitações do GEOBIA. Além disso, a área elencada para o estudo teve que atender os seguintes requisitos:

- Ter sido mapeada anteriormente para fins de comparação com os resultados obtidos;
- Ser amplamente estudada e conter farta documentação bibliográfica, para permitir análises mais consistentes;
- Conter relativa variedade de tipos de modelados, para que fosse possível avaliar a vinculação e/ou desvinculação entre os dados obtidos pelo MDE com a realidade do campo.

Dado o caráter experimental do trabalho, essas características foram importantes para calibrar os parâmetros utilizados ao longo da classificação, permitindo a comparação dos resultados alcançados com o conhecimento existente, classificações pretéritas e verificação de campo.

A área ocupa uma posição peculiar do ponto de vista geomorfológico, entre duas grandes Morfoestruturas: o Cinturão Orogênico do Atlântico a leste e a Bacia do Paraná a oeste. Quanto à compartimentação Morfoestrutural da área, PIRES NETO (1996) destaca que as principais estruturas compartimentadoras do relevo são o Lineamento Rio da Cachoeira-Rio Jaguari-Rio Camanducaia, Zona de Cisalhamento de Socorro, Lineamento do Interflúvio Atibaia-Jaguari e Lineamento Santo Antônio de Posse-Mogi Mirim.

A parte oeste do Planalto Serra Negra/Lindóia, faixa central da área de estudo, apresenta-se mais lisa quanto ao aspecto visual da rugosidade topográfica, onde se verifica a marcante ocorrência de dobras do Neoproterozóico e forte controle estrutural na drenagem. As formas de relevo mais dissecadas na faixa central se restringem a poucas áreas no centro-sul, nos morros entre Jaguariúna e Pedreira, bem como nas proximidades de Santo Antônio de Posse, onde o Mapa Geológico do CPRM (2004) indica a ocorrência de falhas ou zonas de cisalhamento compressionais.

Na extremidade leste, onde ocorre maior rugosidade topográfica, encontram-se as maiores altitudes e declividades da área de estudo, com destaque para as Serras dos Mosquitos e Negra, localizadas entre os municípios de Serra Negra e Lindóia, bem como as Serras do Pico do Bugio, do Matão, do Brazinho, do Oratório e da Pompéia, que dividem os municípios de Monte Alegre do Sul e Socorro. Essas toponímias locais correspondem às cristas monoclinais quartzíticas niveladas e separadas por vales subsequentes, afluentes do Rio do Peixe (ALMEIDA, 1974). Outra área que merece destaque, apesar de altitude reduzida, são as Serras do Fundão e dos Feixos, separadas entre si pelo Rio Camanducaia, cuja planície estende-se para montante até a vizinhança com o perímetro urbano do município de Amparo.

Em sua compartimentação, ALMEIDA (1974) classifica tais áreas como Zona Cristalina do Norte, definida como uma faixa de rochas pré-cambrianas que estenderia desde as terras altas do sudoeste mineiro até a região sedimentar da Depressão Periférica. Ao sul, o limite estrutural e topográfico seria dado pelo Rio Jundiá, com a marcante alteração da litologia, de predominantemente gnáissicas para os xistos da Serrania de São Roque. Ao norte, é artificial,

pois está limitada pela divisa de estados, apesar da continuidade do padrão estrutural e litológico.

A partir de 1979, essa unidade foi subdividida em subzonas (IPT, 1983), correspondendo, à área de estudo, a denominação Serrania de Lindóia, considerada uma transição interplanáltica, na qual a altitude eleva-se gradativamente da Depressão Periférica e Morraria de Jundiá até a divisa com o estado de Minas Gerais. Tal como verificado por CPRM (2004), IPT (1983) identificou grandes falhas que cortam as litologias do embasamento, composto por gnaisses, migmatitos, quartzitos e granulitos, penetrados por intrusões graníticas. As falhas condicionam extensos trechos lineares de vales e as cristas geralmente sustentadas por quartzitos e granitos alongando-se na direção NE-SW. Os principais canais fluviais, nessas áreas, são superimpostos, correndo transversalmente às estruturas NE-SW e drenando suas águas para a depressão, casos típicos podem ser observados nos leitos dos rios Atibaia, Jaguari, Camanducaia e do Peixe. Os três primeiros são tributários do Piracicaba, ao passo que o último, drena para noroeste, compondo a bacia hidrográfica do Mogi-Guaçu.

A Zona do Médio Tietê corresponde à porção central da Depressão Periférica Paulista, drenada pelos Rios Tietê e seus principais afluentes, o Piracicaba e Sorocaba. Os rios Jaguari e Atibaia apresentam ao longo de seu curso corredeiras, rápidos e pequenas cachoeiras, estabelecidas pelas intrusões de diabásio nas camadas inferiores do Grupo Tubarão (ALMEIDA, 1974). A constituição geológica na área de estudo, segundo CPRM (2004), é composta por sedimentos do Irati, Tatuí e, predominantemente, Itararé, além de intrusões de diabásio (sills e lacólitos) e lateritas nas proximidades da transição com o Planalto de Serra Negra/Lindóia.

Ao norte da área de estudo, próximo ao município de Socorro, existem áreas pertencentes à bacia hidrográfica do Rio Mogi-Guaçu, que tem como um de seus afluentes, o Rio do Peixe, cuja nascente localiza-se próxima ao município de Socorro, drenando para noroeste pelo planalto até alcançar a depressão periférica.

6 MATERIAIS E MÉTODOS

6.1 Materiais

Para o desenvolvimento do trabalho, foram utilizados os insumos discriminados no quadro a seguir.

Material	Fonte
Imagem Landsat 8	USGS/GLOVIS
Dados SRTM v3.0 (SRTMGL3)	NASA/USGS/EOSDIS
Imagens do Projeto Radam-D	CPRM
Mapa Geológico CPRM	CPRM/GEOBANK
Mapa Geomorfológico RADAMBRASIL	Projeto RADAMBRASIL
Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo (Ross & Moroz, 1997)	Departamento de Geografia – FFLCH-USP

Quadro 6.1 – Materiais utilizados para o desenvolvimento da dissertação.

Para a condução dos experimentos, foram realizados procedimentos operacionais de preparação das variáveis utilizadas, análise visual e estatística das características da área de estudo, elaboração da rede semântica e análise orientada a objetos geográficos (GEOBIA), avaliação dos resultados da classificação. O quadro a seguir apresenta, para as principais etapas do trabalho, os aplicativos (*softwares*) utilizados, o seu desenvolvedor e o respectivo procedimento realizado ao longo do trabalho.

Aplicativo	Desenvolvedor	Procedimento realizado
Envi 4.8	ITT Visual Information Solutions	Preparação das imagens Landsat 8
Arc GIS 10.2 for Desktop	ESRI Inc.	Preparação de variáveis morfométricas e análise estatística
Microsoft Office 2010	Microsoft Corporation	Edição de textos e análise estatística
eCognition Developer 8	Trimble Germany GmbH	Elaboração da Rede Semântica e Análise Orientada a Objeto
GPS Track Maker 13.9	Geo Studio Technology Ltd	Planejamento e análise de dados de campo

Quadro 6.2 – Aplicativos utilizados na coFigura 6.1Indução do trabalho

6.2 Métodos

O desenvolvimento do trabalho foi conduzido a partir da realização de experimentos para a elaboração de um mapa geomorfológico com técnicas de GEOBIA, seguindo os princípios adotados nos trabalhos de ASSELEN & SEIJMONSBERGEN (2006), CAMARGO (2008) e FERNANDES (2013). Posteriormente, os resultados obtidos pela classificação foram comparados com o Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo (ROSS & MOROZ, 1997), produzido com procedimentos de interpretação visual, de mesma metodologia e publicado na escala 1:500.000. Cada uma das etapas está descrita pormenorizadamente a seguir e representadas no fluxograma abaixo.

Figura 6.2 – Fluxograma com os procedimentos metodológicos utilizados.

6.2.1 Análise Preliminar

No início do trabalho, foram utilizadas as premissas de HAY & CASTILLA (2006) para realizar um levantamento prévio das potencialidades e fragilidades da GEOBIA, para, posteriormente, proceder com a busca de uma área de estudo. Para tanto, esta deveria atender aos seguintes critérios:

- Ter sido mapeada anteriormente (se possível em diversas escalas) para fins de comparação com os resultados obtidos;
- Ser amplamente estudada e conter farta documentação bibliográfica, para permitir análises e avaliações mais consistentes;
- Conter relativa variedade de tipos de modelados, para que fosse possível verificar a vinculação e/ou desvinculação entre os dados obtidos pelo MDE com a realidade do campo.

Dado o caráter experimental do trabalho, essas características foram importantes para calibrar os parâmetros utilizados ao longo do mapeamento, permitindo a comparação dos resultados alcançados com o conhecimento existente, classificações pretéritas e verificação de campo.

Foi selecionada, portanto, a faixa de transição entre o Cinturão Orogênico do Atlântico e Bacia Sedimentar do Paraná, mais especificamente, entre as coordenadas 22°45'S 47° 15'W (extremo sudoeste) e 22°30'S 46° 35'W (extremo nordeste). Os principais pontos de interesse na área de estudo tem acesso facilitado pelas diversas rodovias estaduais, federais e vicinais, dentre as quais, destacam-se a SP- 330 (Rodovia Anhanguera) e BR-381 (Rodovia Fernão Dias).

Além de atender às condicionantes acima elencadas, a região foi objeto de estudos de diversos autores, dentre os quais se encontram AB' SÁBER (1949, 1969) e QUEIROZ NETO & JOURNAUX (1978), favorecendo, portanto, a elaboração da rede semântica utilizada na classificação.

6.2.2 Organização e integração dos dados para o modelo cognitivo

Para utilização dos materiais elencados no capítulo 6.1, os mesmos foram organizados, processados e integrados num produto cartográfico único denominado Mapa de Integração de Dados (ANEXO 01). As etapas de elaboração desse documento estão descritas a seguir.

6.2.2.1 Imagens Landsat 8

As imagens Landsat serviram para o primeiro nível de segmentação, no qual foram identificadas porções do terreno emersas e imersas na área de estudo. Lançado pela NASA em fevereiro de 2013, este satélite é capaz de imagear a Terra inteira a cada 16 dias, com 8 dias de diferença do Landsat 7. A plataforma opera com dois instrumentos imageadores: o sensor denominado *Operacional Land Imager* (OLI) e o *Thermal Infrared Sensor* (TIRS).

O produtos gerados pelo sensor OLI são 8 bandas multiespectrais de resolução de 30m, com destaque para a faixa correspondente à Banda 5, do Infravermelho próximo (NIR). Como é possível observar na figura a seguir, o sensor OLI apresenta maior resolução espectral nessa banda em relação a versões anteriores, favorecendo a utilização dessas informações para estudos de detecção de descontinuidades entre terras emersas e água.

Figura 6.3 – Distribuição das bandas dos sensores ETM+, OLI e TIRS ao longo do espectro eletromagnético.

Fonte: http://landsat.usgs.gov/ldcm_vs_previous.php

Apesar da melhoria significativa na capacidade de detectar mudanças da superfície da terra em relação aos sensores do Landsat 7, a resolução radiométrica dos sensores OLI e TIRS geram números de *Digital Number* (DN) distintos daqueles oriundos do Landsat 7, que possui 8-bits e, portanto, *range* de 0-255 níveis de cinza.

Produtos são fornecidos em formato 16-bit *unsigned integer* (55.000 níveis de cinza), mas podem ser convertidos para TOA *reflectance* ou TOA *radiance* utilizando-se os metadados.

Informações adicionais sobre essa operação podem ser obtidos em no site o Serviço Geológico Americano – USGS: http://landsat.usgs.gov/Landsat8_Using_Product.php .

6.2.2.2 Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo (ROSS & MOROZ, 1997)

O mapa geomorfológico do Estado de São Paulo (ROSS & MOROZ, 1997) é resultados de trabalhos desenvolvidos no Laboratório de Geomorfologia do Departamento de Geografia / Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas /Universidade de São Paulo, que contou com participação do FINEP, Instituto de Pesquisas Tecnológicas e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo. A primeira instituição contribuiu com recursos financeiros para aquisição das imagens de radar produzidas pela Aerofoto Cruzeiro a partir dos negativos gerados para o Projeto RADAMBRASIL; o IPT, por intermédio do Laboratório de Cartografia Geotécnica da Unidade de Geologia Aplicada, elaborou a base cartográfica e executou os serviços de digitalização; a FAPESP viabilizou a publicação dos volumes de mapas e relatório técnico-científico (ROSS & MOROZ, 1997).

O mapa foi obtido no Departamento de Geografia-FFLCH-USP em formato *Computer-Aided Design* (CAD) e convertido para *shapefile*. Foram necessárias edições manuais de correção do traçado, no entanto, a divisa entre as duas principais morfoestruturas da área de estudo, permaneceu inalterada. Ao arquivo, foi atribuído o Datum horizontal WGS 84 para adequá-lo à base de dados do trabalho. O banco de dados elaborado para os polígonos mapeados em CAD contém as informações da legenda, ou seja, morfoestrutura, morfoescultura, padrão de formas, o respectivo índice de dissecação do relevo, os tipos de solos, além de litologias predominantes para cada unidade mapeada. A figura a seguir representa o *layout* resumido consolidado para a presente dissertação, no qual os algarismos em vermelho na figura a seguir são meros identificadores utilizados na etapa de análise estatística.

Figura 6.4 – Layout do Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo (ROSS & MOROZ, 1997) organizado para os experimentos realizados nesta dissertação.

As áreas verdes correspondem à Morfoestrutura Bacia Sedimentar do Paraná, que, na área de estudo contém a Morfoescultura Depressão do Médio Tietê. Apesar da existência de canais de drenagem pertencentes à bacia hidrográfica do Rio Mogi-Guaçu, não foram encontrados elementos para assegurar que há, no perímetro da área de estudo, terrenos correspondentes à Unidade Morfoescultural Depressão do Mogi-Guaçu.

No Cinturão Orogênico do Atlântico, o Planalto Atlântico está mapeado em dois tons, roxo, para áreas cuja altitude excede os 900m, e lilás para as altitudes abaixo de 900m. Ao centro da área de estudo, também em lilás, observa-se uma faixa de terrenos com características do modelado semelhantes ao Planalto de Jundiá.

6.2.2.3 Mapa Geológico da Folha SF23 – Rio de Janeiro (CPRM, 2004)

As informações referentes à geologia, como estruturas tectônicas, litotipos e recursos minerais foram obtidas da Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo, disponibilizada pelo Serviço Geológico do Brasil – CPRM, pela interface Geobank (<http://geobank.sa.cprm.gov.br/>).

Os dados compilam informações de diversas fontes como projeto executados pelo CPRM e com apoio de universidades, servindo como referência de verificação da geologia e cronologia de materiais no âmbito desta dissertação. As unidades geológicas mapeadas foram destacadas, no mapa de integração, com cores respectivas às suas características e idades.

Figura 6.6 – Faixas de imageamento da Folha SF-23-Y-A Campinas. Foram utilizadas, para a análise visual, as faixas de número 4, 5, 6 e 7 – Fonte: Serviço Geológico do Brasil-CPRM

As imagens foram disponibilizadas em formato *.tif e foram georreferenciadas para poder compor a base de dados. O procedimento foi realizado no aplicativo ArcGIS, a partir da coleta de pontos de controle pelo Landsat 8 (Datum WGS84). Seguindo procedimentos semelhantes àqueles adotados por SOUZA JUNIOR & PRADO (2006), para cada faixa de imageamento, foram coletados um mínimo de nove pontos de controle sendo o ajustamento foi realizado pela polinomial de segundo grau. Por conta da grande diferença temporal entre as imagens, os pontos coletados concentraram-se em cruzamentos de estradas, evitando-se áreas sujeitas a grandes variações de posição, como margens de rios e reservatórios. Não foi realizada coleta de *Ground Points Control* (GPC), pois as imagens apenas subsidiaram análise e comparação visual, não interferindo nos resultados de cálculos estatísticos e tampouco em análises espaciais. Ademais, os resultados foram considerados adequados para os objetivos e escala.

Na figura a seguir, é possível verificar uma comparação entre o mosaico de imagens georreferenciadas do Projeto Radam-D e o trecho do Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo (ROSS & MOROZ, 1997) correspondente da área de estudo.

Figura 6.7 – Comparação entre Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo (ROSS & MOROZ, 1997) e Mosaico de imagens georreferenciadas do Projeto Radam-D

O georreferenciamento das imagens do Radam-D foi importante para a reconstituição expedita dos procedimentos de interpretação visual de padrões de formas para a elaboração dos mapas geomorfológicos do Projeto RADAMBRASIL (RADAMBRASIL, 1983) e do Estado de São Paulo (ROSS & MOROZ, 1997).

6.2.2.5 Mapa Geomorfológico do Projeto Radambrasil (RADAMBRASIL, 1983)

O mapa geomorfológico elaborado pelo Projeto RADAMBRASIL foi utilizado, tal como as imagens do Radam-D, para fins de comparação visual. Para tanto, o mapa foi convertido para formato de imagem *.tif e georreferenciado a partir de procedimentos semelhantes àqueles apresentados na etapa anterior. A seleção de pontos de controle, no entanto, foi facilitada pela existência de grade de referência no mapa.

A referência horizontal adotada foi o Datum WGS 84, utilizado na base de dados do trabalho. A figura a seguir demonstra as unidades geomorfológicas mapeadas pelo projeto RADAMBRASIL para a área de estudo.

MAPA GEOMORFOLÓGICO RADAMBRASIL V.32

Figura 6.8 – Unidades geomorfológicas mapeadas pelo Projeto RADAMBRASIL correspondentes à área de estudo. O mapa georreferenciado foi utilizado apenas para comparação visual.

Para a área de estudo, o Projeto RADAMBRASIL mapeou, como Domínio Morfoestrutural, a Faixa de Dobramentos Remobilizados, que se estende por uma vasta área do Brasil de sudeste. Como Região Geomorfológica, destaca-se o Planalto de Amparo, composto pelas Unidades Planalto de São Roque-Jundiaí e Planalto de Lindóia.

Na porção correspondente ao Domínio da Bacia e Coberturas Sedimentares do Paraná, destacou-se a Região Geomorfológica denominada Depressão Paulista, que contém a unidade Depressão do Tietê-Mogi Guaçu.

6.2.2.6 Dados SRTM

Foi elaborado um mosaico a partir de 2 (duas) cenas do SRTM versão 3.0, denominadas S23W48 e S23W47, disponíveis para *download* no site da *Nasa's Earth Observing System Data and Information System* (<http://earthdata.nasa.gov>).

O SRTM V3.0 consiste na terceira versão de dados processados a partir da coleta realizada em 2000. Na primeira versão, SRTM V1.0, os dados foram processados sistematicamente usando o sistema computacional *SRTM Ground Data Processing System* (GDPS) do JPL/NASA. Neste procedimento, os ecos do radar foram convertidos em dados digitais de elevação, sendo realizado e ajustado por continente. No SRTM V2.0 e V2.1, os dados foram aplicados diversos procedimentos de pós-processamento pela NGA, incluindo edição, remoção de *spikes* e *pits*, definição de cotas de corpos d'água e linha de costa.

A versão 3.0 foi processada no âmbito do programa NASA MeASURES (*Making Earth System Data Records for Use in Research Environments*), sendo que todos os *voids* foram eliminados, pelo método *Delta Surface* (GROHMANN et al, 2006), utilizando dados de outros modelos digitais de elevação, como o *Advanced Spacebourne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model* versão 2 (ASTER GDEM2), *US Geological Survey Global Multi-resolution Terrain Elevation Data* (USGS GMTED2010) ou ainda *USGS National Elevation Dataset* (NED). A Figura 6.9 – Mosaico SRTM v3.0 utilizado na presente dissertação. representa o mosaico dessa versão utilizado nos experimentos desta dissertação.

Figura 6.9 – Mosaico SRTM v3.0 utilizado na presente dissertação.

Os dados do SRTM V3.0, tal como nas versões anteriores, são distribuídos com resolução espacial de 1 arc-second (≈ 30 m) para os Estados Unidos e territórios; e 3 arc – second (≈ 90 m) para as outras áreas do globo. A derivação para os dados de 3 arc-seconds foi realizada de duas formas diferentes: *sampling method* (SRTMGL3S) e *averaging method* (SRTMGL3).

Deriving 3 arc-second data from 1 arc-second data: Sampling Method versus Averaging Method.

Figura 6.10 – Diferença nos métodos de reamostragem de dados SRTM. A esquerda está representado o *Sampling Method*, à direita o *Averaging Method*.

Na condução dos experimentos, optou-se pela utilização dos dados gerados por *averaging method* que, apesar da ligeira redução na resolução espacial, apresentam menos ruído (*noise*). A partir dos MDE SRTM foram geradas variáveis geomorfométricas que subsidiaram os procedimentos de análise visual, estatística e segmentação multirresolução.

6.2.2.7 Geração de variáveis para o modelo cognitivo

A partir do MDE, obtiveram-se as informações acerca da elevação, que para os fins desta dissertação, foi considerada como a altitude dos terrenos, conforme representado na Figura 6.9. Juntamente com as informações de declividade, esta é uma das principais variáveis que compuseram o modelo cognitivo.

A declividade, foi gerada partir dos MDE SRTM no aplicativo ArcGIS. Para a integração de dados, foi elaborado um mapa que subsidiou a análise visual e as classes de declividade na

representação foram estabelecidas de acordo com o conhecimento empírico do autor em relação à área de estudo. A figura abaixo representa o mapa clinográfico (declividades) gerado a partir do MDE SRTM para a análise exploratória e posterior elaboração do modelo cognitivo.

Figura 6.11 – Mapa clinográfico (declividades) da área de estudo elaborado a partir do MDE SRTM V3.

Além da declividade, outra variável obtida a partir do MDE SRTM foi o Relevo Sombreado, com os critérios de iluminação definidos com azimuth a 90° e elevação de 45°. Tais parâmetros foram adotados no intuito de simular as imagens geradas pelo Projeto RADAMBRASIL. A figura a seguir foi elaborada para comparação entre as imagens do Projeto Radam-D (OLIVEIRA et al, 2011) e relevo sombreado gerado com dados do SRTM e parâmetros citados anteriormente.

Figura 6.12 – Comparação entre o mosaico de imagens SF-23-A fornecidas pelo Projeto Radam-D e relevo sombreado gerado a partir de dados SRTM V3.0 com azimute 90° e elevação 45°.

6.2.2.8 Integração de dados

Todos os dados organizados anteriormente deram origem a mapas temáticos, que subsidiaram a análise exploratória (visual e estatística) e, posteriormente, a conversão de chaves de interpretação em atributos da rede semântica. Além da organização da base de dados descrita nos capítulos acima, foram elaborados perfis topográficos transversais à transição entre o Cinturão Orogênico do Atlântico e a Bacia Sedimentar do Paraná.

Os procedimentos de segmentação multirresolução e GEOBIA foram realizados a partir das variáveis: elevação (MDE) e declividade (SLOPE), ambas obtidas a partir do MDE SRTM. O relevo sombreado foi utilizado, apenas, para a visualização e não compôs as variáveis da segmentação. A escolha por tais variáveis se deu com base nos resultados obtidos por Fernandes (2013), que utilizou outras variáveis, como curvatura horizontal e curvatura vertical, sem obter, contudo, resultados considerados satisfatórios para a compartimentação e classificação do relevo numa escala semelhante.

6.2.3 Análise exploratória da área de estudo

A análise exploratória trata-se de um procedimento realizado para obtenção de subsídios para a conversão de chaves de interpretação em atributos da rede semântica hierárquica e funções de pertinência *fuzzy*. Para tanto, procedeu-se com comparação visual e estatística das unidades geomorfológicas mapeadas por ROSS & MOROZ (1997) com as variáveis do modelo cognitivo.

Na primeira fase, os mapas temáticos produzidos foram utilizados para comparar as informações disponíveis com as características físicas da área de estudo. Foram avaliadas diversas possibilidades de utilização desses planos para composição dos atributos da rede semântica.

Numa segunda etapa, foi analisado o padrão estatístico para cada unidade mapeada no 3º Táxon por ROSS & MOROZ (1997) numa tentativa de buscar critérios de separação que também, seriam incorporados aos atributos da rede semântica. Para esta fase, recorreu-se a procedimentos de estatística descritiva com os dados de elevação e declividade no ArcGIS e Microsoft Excel.

6.2.3.1 Análise visual

A partir da análise visual, realizada sobre o mapa de integração de dados, algumas premissas foram estabelecidas e corroboradas, pela análise quantitativa (estatística). A utilização dessa base de dados permitiu, ainda, a comparação das diversas variáveis do modelo cognitivo com os produtos de mapeamento geomorfológico manual.

Os setores altimétricos definitivos adotados no Mapa Hipsométrico foram estabelecidos de acordo com a alteração do padrão de declividades verificados no gráfico de dispersão, conforme descrito no capítulo 6.2.3.2. A partir da análise do mapa, é possível identificar nítido gradiente altimétrico de leste para oeste, ou seja, do Cinturão Orogênico do Atlântico, com altitudes de até 1300m para as porções mais rebaixadas na Bacia Sedimentar do Paraná, com elevações de 510m, nas proximidades do Reservatório Salto Grande. A área de estudo está próxima do limite da Depressão Média do Tietê com a Depressão do Mogi-Guaçu, fato que explica a ocorrência de maiores altitudes, da ordem de 660m, na porção norte. Os canais de maior relevância drenam para sudoeste, até desaguar no Rio Piracicaba (já fora da área de estudo).

Após uma primeira análise expedida, decidiu-se dividir a área de estudo em 3 (três) trechos no intuito de organizar os procedimentos subsequentes. A figura a seguir demonstra o resultado obtido, com as respectivas denominações.

Figura 6.13 – Divisão expedida dos trechos da área de estudo.

Essa divisão levou em consideração a diferença no aspecto textural visível na imagem de Relevo Sombreado gerada. O Trecho 1, destacado em vermelho, apresenta maior rugosidade das formas de relevo. O Trecho 2, em amarelo, localizada na porção central da área de estudo, corresponde à faixa de transição entre o Cinturão Orogênico do Atlântico e a Bacia Sedimentar do Paraná. A cor verde, por fim, representa a porção da área de estudo relativa à Bacia do Paraná. A escolha das cores foi aleatória, no intuito de representar e localizar porções de interesse na área de estudo, não possuindo qualquer relação com o mapa hipsométrico. O critério da rugosidade textural do relevo na divisão expedida foi utilizado numa primeira análise sobre a área, no entanto, rapidamente verifica-se a existência de exceções.

Na porção centro norte da área de estudo (Trecho 3) nas proximidades da cidade de Santo Antônio de Posse, a norte da Rodovia SP-107, uma feição de destaque ocorre devido à existência de rochas da Formação Serra Geral, mapeadas por CPRM (2004). Apesar de apresentar aspecto visual de relevo mais dissecado que o restante da depressão, e algumas unidades do planalto, a geologia faz com que não seja classificada como planalto, que está associada à Morfoestrutura da Bacia do Paraná. Na porção centro sul (Trecho 2), nos morros entre as cidades de Jaguariúna e Pedreira, por onde drenam os vales do Jaguari e Atibaia, verifica-se a existência de terrenos distintos, quanto à dissecção, em relação ao restante da transição planalto-depressão.

A partir das Serras do Fundão e dos Feixos (localizadas a sudoeste do Trecho 1), a média de altitude aumenta drasticamente desde a faixa de 750m até os 1300m no topo das cristas monoclinais. No entanto, mesmo nessas porções, percebe-se a existência de baixios de até 660m, com destaque para os vales dos Rios do Peixe e Camanducaia.

Os rios Atibaia, Jaguari e Camanducaia, bem como seus afluentes são responsáveis pela ocorrência de áreas de menores altitudes que marcam a transição planalto-depressão. A figura a seguir demonstra a comparação entre as faixas de altimetria com as unidades geomorfológicas correspondentes. De acordo com a legenda proposta por ROSS & MOROZ (1997), as tonalidades mais escuras, corresponderiam a unidades com altitudes maiores que 900m, no entanto, verifica-se que não é possível estabelecer tal relação de maneira direta. Tal fato pode ser explicado pela impossibilidade de aferir altitudes a partir de imagens de radar que não contem com a técnica de interferometria SAR (InSAR). Desta forma, todo o controle deve ser feito por levantamentos de campo, o que tornaria os mapeamentos onerosos em demasia. As não conformidades verificadas entre a relação altitude e unidade geomorfológica, também se estendem às outras porções do Cinturão Orogênico do Atlântico. De acordo com a legenda do mapa de referência, as menores altitudes para a área seriam da ordem de 800m, ao passo que, no mapa hipsométrico foram constatadas altitudes de até 680m.

Tais discrepâncias podem ser facilmente explicadas a partir da análise de procedimentos do mapeamento manual. Inicialmente, a compartimentação prévia foi realizada sobre imagens de SLAR, a verificação de campo foi realizada por amostragem, subsidiando, pois a leitura da evolução geomorfológica local. Os recursos de geotecnologias permitem esta verificação com maior rapidez e abrangência, podendo subsidiar maiores questionamentos às interpretações preliminares. A figura a seguir demonstra as discrepâncias citadas no que tange à altitude em relação às unidades geomorfológicas mapeadas manualmente.

Figura 6.14 – Comparativo entre Mapa Hipsométrico e Geomorfológico

Na unidade correspondente às Serras do Fundão e dos Feixos, próximas ao município de Amparo, as altitudes variam entre 680 e 990, tendo sido classificadas, no mapa geomorfológico como unidades cuja altitude encontra-se acima de 900m. No entanto, entre Serra Negra e Monte Alegre do Sul, foram constatados terrenos acima de 990m de altitude classificados como inferiores à 900m. Esta discrepância se deve à existência de eventuais contrastes de linhas de cume e morros mais elevados com o entorno.

O mapa de declividades (ou clinográfico) demonstra certa correspondência entre as áreas mais inclinadas com as porções mais elevadas do terreno, sendo que as declividades menores que 2° (dois graus) são restritas às planícies do Rio Camanducaia, Ribeirão Pirapitingui, Rio Atibaia, Rio Jaguari e em áreas restritas do Rio do Peixe e alguns de seus afluentes. Numa análise grosseira, verifica-se uma estratificação de oeste para leste, na qual a Depressão Periférica apresenta declividades predominantes até 10° (dez graus), sendo que inclinações de até 20° (vinte graus) são restritas à faixa de transição. A partir das Serras do Fundão e Feixos, seguindo para leste até os limites da área de estudo, ocorre o predomínio de

Apesar de a compartimentação visual ter sido realizada sobre imagens de Radar e baseada no critério de dissecação do relevo, verifica-se uma nítida conformidade entre as unidades geomorfológicas e os padrões de declividade. As exceções restringem-se ao setor nordeste do Trecho 3, onde se verificam as rochas da Formação Serra Geral, a oeste do município de Santo Antônio de Posse e nos morros de topos convexos a leste de Jaguariúna (Trecho 2), onde o limite traçado exclui porções do interflúvio entre os rios Jaguari e Camanducaia. Outra característica que ressalta a vista, no mapa clinográfico, são as áreas de baixas declividades correspondentes às planícies dos rios do planalto, como no caso dos Rios Camanducaia e do Peixe, além do Ribeirão da Penha, localizado a leste do município de Itapira.

Conforme demonstrado no capítulo 6.2.2.7, o relevo sombreado e o mosaico de imagens de radar apresentam aspecto visual semelhante, sobretudo no que tange à representação das feições de maior destaque, como no caso da faixa de transição entre o

planalto e a depressão (Trecho 2); nas Serras do Fundão e dos Feixos, próximos ao distrito de Arcadas e município de Amparo; bem como na região serrana próxima aos municípios de Serra Negra, Lindóia e Socorro. Os canais de drenagem na depressão periférica e a planície do Rio Camanducaia, no entanto, são mais visíveis no SRTM. Para título de comparação, as unidades geomorfológicas delimitadas manualmente foram transpostas para a imagem de relevo sombreado. Verificou-se que em alguns casos, há pequenos deslocamentos dos contornos em relação à feição geomorfológica a ser mapeada. Esta inconsistência na acurácia, ocorreu devido ao acúmulo natural de distorções desde a interpretação por parte do especialista, passando pela digitalização, alterações de datum e sistema de projeção até o estágio atual. Exemplos claros desses pequenos deslocamentos foram constatados nas Serras do Fundão e Feixos; nos terrenos baixos entre Serra Negra e Serra do Oratório; além do interfúvio entre os rios Camanducaia e Jaguari.

A seguir, na figura, é possível comparar as unidades geomorfológicas mapeadas com os compartimentos destacados pelo relevo sombreado. O azimuth de iluminação (90°) destacou satisfatoriamente as principais feições geomorfológicas da área de estudo, mesmo em áreas da depressão periférica, como no caso da porção centro-norte, onde ocorrem rochas da Formação Serra Geral, formando uma área ligeiramente mais dissecada que o entorno.

Figura 6.16 – Comparativo entre relevo sombreado gerado a partir do MDE SRTM e Mapa Geomorfológico.

Por fim, na análise visual, procedeu-se com a observação dos perfis topográficos representados a seguir:

As maiores altitudes estão concentradas no perfil central, nas serras ente Serra Negra e Socorro. Em contrapartida, a transição do planalto com a depressão, no perfil B-B', apresenta-se consideravelmente menos dissecada que os vizinhos. Nos perfis A-A' e B-B'', a transição é marcada por uma quebra no padrão de altitude, ao passo que no perfil C-C' ocorre gradualmente, sendo interrompida, apenas localmente, por feições topográficas de destaque, como o interflúvio entre os Rios Camanducaia e Jaguari.

Comparação entre Mapa Geomorfológico e Perfis Topográficos

Figura 6.17 – Perfis topográficos W-E, transversais à faixa de transição entre Cinturão Orogênico do Atlântico e Bacia Sedimentar do Paraná.

Apesar de eventuais inconsistências no que tange à acurácia posicional, as feições geomorfológicas de interesse podem ser destacadas com os dados SRTM e as variáveis geomorfométricas apresentando resultados convergentes com a interpretação visual realizada por ROSS & MOROZ (1997).

6.2.3.2 Análise estatística

Na análise estatística, foram elaborados gráficos de dispersão, no intuito de observar a relação entre altitude e declividades, bem como gráficos de *Boxplot*, para caracterização estatística de cada unidade de padrões de formas mapeadas por ROSS & MOROZ (1997).

Inicialmente, foi necessário extrair gerar as informações de declividade. Existem diversos algoritmos para o cálculo da declividade. No caso em tela, a função “*slope*” do aplicativo ArcGIS, utiliza um algoritmo que calcula a taxa de mudança no valor entre uma célula

(*pixels*) e seus vizinhos. A máxima mudança na elevação na distância entre uma célula e seus oito vizinhos identifica a sua vertente mais íngreme, conforme representado na Figura 6.18.

Figura 6.18 – Exemplo de dado raster *slope* (direita), representado em graus (°) e gerado no aplicativo ArcGIS a partir de um MDE (esquerda). Fonte: ArcGIS 10.2 Desktop Help

O gráfico de dispersão foi elaborado a partir de todos os pixels da área de estudo. Cada pixel do MDE foi exportado para uma tabela com os valores altitude, declividade e uma coluna criada para identificação. No eixo das abcissas, foram plotados os dados de altitude, e declividades nas ordenadas.

Os valores de declividade foram separados em faixas, em conformidade com os setores altimétricos estabelecidos no mapa hipsométrico. O gráfico resultante está representado na figura a seguir:

Gráfico 6.1 –Diagrama de dispersão dos valores de altitude e declividade da área de estudo

Verifica-se uma grande concentração de declividades entre 0° e 5°, em praticamente toda a área de estudo, ou seja, desde a faixa com altitudes entre 510m e 1100m. A ocorrência de baixas declividades, mesmo nos setores mais íngremes do Planalto Serra Negra/Lindóia se deve à existência de planícies como a do Rio Camanducaia e do Rio do Peixe. Na depressão periférica, estes setores concentram-se nas planícies do Ribeirão Pirantingui, Rio Jaguari e Atibaia, bem como nos topos das colinas amplas.

A plotagem dos pontos indica relativa diferenciação de padrões de declividade na faixa entre 600 até 680 metros. Em áreas mais baixas, verifica-se a ocorrência de menores inclinações do terreno, ao passo que as amostras com declividades maiores que 20° estão concentradas em altitudes maiores que 680m. O setor entre 510 e 580 apresenta as mais baixas declividades da área de estudo, sendo que as maiores de 10° restringem-se a alguns *outliers*. O mapa a seguir representa, em verde, as áreas com altitudes de até 580m.

Análise de Setores Atimétricos

Figura 6.19 – Terrenos correspondentes às altitudes abaixo de 580m

Quanto ao setor entre 580-610m, verificou-se que a distribuição espacial é restrita ao entorno dos principais canais fluviais da Depressão do Médio Tietê, penetrando no planalto apenas nas proximidades dos leitos do Rio Jaguari e Rio Camanducaia.

Análise de Setores Atimétricos

Figura 6.20 – Terrenos correspondentes à faixa de altitude entre 580 e 610m.

Verificou-se que a faixa entre 610 e 660 m de altitude ocorrem, aproximadamente, os limites traçados para compartimentação do planalto e depressão. Essa constatação é de grande importância pois indica que a altitude pode ser um dos parâmetros fundamentais da rede semântica e que, portanto, pode ser utilizado como um critério para a classificação. Apesar disso, áreas de colinas ao redor do Ribeirão Piratingui também apresentam altitudes nessa faixa, no entanto, quando da elaboração da rede semântica, pode-se condicionar a classificação da depressão a um atributo de posição, permitindo, assim, a separação dessas

áreas em relação ao planalto. A seguir, está representada em amarelo as áreas correspondentes à faixa de altitude de 610-660m.

Figura 6.21 – Terrenos correspondentes à faixa de altitude entre 610 e 660m.

O gráfico de dispersão indica, ainda, que as declividades aumentam gradativamente entre 680 e 780m de altitude, no entanto, a distribuição espacial deste setor não foi conclusivo. Merece destaque o fato de que, além de pequenas áreas a noroeste, a porção centro-norte, onde verificou-se a existência de rochas da Formação Serra Geral permanece nesta faixa de altitude, ao contrário de praticamente toda a área da depressão. Isto leva a crer que a altitude não será um critério de separação conclusivo, especificamente para este local, a despeito do que ocorreu para as outras partes da transição entre o planalto e a depressão. A figura a seguir ilustra esta constatação.

Figura 6.22 – Terrenos correspondentes à faixa de altitude entre 680 e 780m.

Acima dos 780m de altitude, as amostras plotadas no gráfico tornam-se gradativamente mais dispersas, dificultando análises mais consistentes. Quando se representa o intervalo 780-

1301m no mapa hipsométrico, verifica-se que os níveis mais rebaixados do planalto foram isolados, restando (em vermelho) apenas linhas de cume com topos mais evidentes.

Figura 6.23 – Terrenos correspondentes à faixa de altitude acima de 780m.

A associação dos padrões de declividade à sua distribuição nas faixas hipsométricas, indica predominância de altitudes de 680 a 780m transição entre Cinturão Orogênico e a Bacia do Paraná, representado, predominantemente no Trecho 2. Apesar da possibilidade de uso do atributo “Elevação” como importante separador de classes na rede semântica, verificou-se a necessidade de utilização de limiares e regras adicionais, tendo em vista a existência de porções da área de estudo que também foram inseridas nesta faixa do mapa hipsométrico, como os arredores das planícies dos Rios do Peixe e Camanducaia.

Na Figura 6.24, é possível identificar, pelos algarismos arábicos em vermelho, cada uma das unidades geomorfológicas mapeadas por ROSS & MOROZ (1997). Estas representam um padrão de formas semelhantes e que, portanto, devem conter quanto à morfologia, substrato geológico e predominância de processos morfogênicos associados. Posteriormente à análise de dispersão, procedeu-se com a identificação de padrões estatísticos dessas unidades mapeadas por ROSS & MOROZ (1997). Em cada uma, os pixels correspondentes foram utilizados para a elaboração de um gráfico *boxplot*, sendo plotados, também, os *mild outliers* e os *extreme outliers*.

Figura 6.24 – Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo (ROSS & MOROZ, 1997)

O resultado permitiu a comparação entre o comportamento estatístico entre as unidades. Este procedimento foi realizado no intuito de verificar como as características geomorfológicas são representadas nos MDE SRTM V3.

Os números em vermelho indicam as unidades geomorfológicas mapeadas no 3º Táxon. Este é apenas um número identificador, conforme representado no gráfico a seguir:

Gráfico 6.2 – Boxplot dos dados de altitude para as unidades de padrão de formas semelhantes mapeadas por Ross & Moroz (1997).

Conforme demonstrado na figura, as unidades de padrões de formas correspondentes ao planalto apresentam comportamento bastante heterogêneo quanto a sua amplitude interquartil (AIQ) bem como a existência de *outliers*. Não foi possível estabelecer uma relação direta e confiável entre as unidades e seu comportamento estatístico. Verificou-se, no entanto, que a ocorrência de extreme *outliers* acontece com mais frequência em unidades de grande área. Esta característica pode estar associada ao acúmulo de erros gerado pelas diversas etapas existentes entre a interpretação visual, digitalização e organização dos arquivos vetoriais.

Comparando os gráficos referentes ao planalto (1-15), com aqueles correspondentes à depressão (17-18), verifica-se uma clara estratificação, sendo a que evidentemente menor nos *whisker* referentes à depressão. Esta constatação coaduna com àquelas da análise visual e do diagrama de dispersão.

Posteriormente à comparação das altitudes, realizou-se a análise estatística dos *boxplot* com os dados de declividade. O resultado obtido com a extração das estatísticas para cada unidade de padrões de formas (3º Táxon) está representado na figura a seguir:

Gráfico 6.3 - Boxplot dos dados de declividade para as unidades de padrão de formas semelhantes mapeadas por Ross & Moroz (1997).

Neste caso, não se verificou uma estratificação evidente como no caso das elevações. Também não foi possível identificar uma clara relação de existência de *outliers*, tanto *mild*

quanto *extreme*. Esta análise foi mais prejudicada pelo acúmulo de erros da digitalização, tendo em vista que a declividade apresenta uma variação maior entre os *pixels* que a altitude. Assim, foram constatados diversos casos em que o traçado da unidade geomorfológica abarcava terrenos com declividades correspondentes à sua vizinha.

O fato de todas as unidades apresentarem terrenos planos (0°) como valor mínimo se deve à existência de pequenas áreas com declividade nula, mesmo nas áreas onde há predomínio de terrenos mais inclinados que 20°.

Apesar da visível estratificação nos gráficos de *boxplot*, no que concerne à compartimentação entre Cinturão Orogênico e Bacia do Paraná, não foi possível identificar evidências claras de separadores entre as unidades de padrões de formas semelhantes.

6.2.4 Conversão de chaves de interpretação em atributos da rede semântica

Apesar de apresentar certa carga de subjetividade, o procedimento de conversão de chaves de interpretação em atributos da rede semântica é considerado válido para o desenvolvimento de trabalhos de classificação por GEOBIA. Uma das possíveis tendências para trabalhos futuros é a criação de bibliotecas de atributos, no sentido de sistematizá-las.

A partir dos resultados obtidos na análise exploratória, procedeu-se com a conversão de chaves de interpretação para atributos da rede semântica e posteriormente a classificação. Para cada unidade taxonômica mapeada por ROSS & MOROZ (1997) no 3° táxon, foi feito um levantamento das características físicas de acordo com os seguintes critérios:

- Hierarquização do Índice de Dissecção do Relevo
- Morfoescultura
- Morfoestrutura
- Substrato geológico (CPRM, 2004)
- Altitudes predominantes
- Declividades predominantes
- Padrão textural (Rugosidade topográfica)
- Padrão de drenagem
- Posição e distribuição espacial pela área de estudo

Exemplo	Classe	Localização aproximada	Chave de interpretação
Dt12	Holambra	Bacia Sedimentar do Paraná, Baixa dissecação do relevo, baixas altitudes, baixas declividades, baixa rugosidade topográfica, densidade de drenagem moderada
Dc24	Jaguariúna	Bacia Sedimentar do Paraná, Baixa dissecação do relevo, menores altitudes da área de estudo, próxima ao Reservatório Salto Grande
Da23	Pedreira	Cinturão Orogênico do Atlântico, feição isolada em relação ao entorno, cortada pelo Rio Camanducaia, altitudes médias à altas, alta densidade de drenagem
Da24	Socorro	Cinturão Orogênico do Atlântico, média a alta declividade, médias a altas altitudes
Da33	Santo Antônio de Posse	Cinturão Orogênico do Atlântico, morros isolados, altitudes e declividades médias, mas maiores em relação ao entorno.

Da34	Socorro	Cinturão Orogênico do Atlântico, altos valores de altitude, altas declividades
Da43	Serra Negra	Cinturão Orogênico do Atlântico, maiores altitudes da área de estudo, mais altas declividades da área de estudo, alta densidade de drenagem
Dc23	Itapira	Cinturão Orogênico do Atlântico, altitude semelhante à bacia sedimentar, médias declividades
Dc24	Lindóia	Cinturão Orogênico do Atlântico, altitudes menos elevadas em relação ao entorno, menor declividade em relação ao entorno
Dc24	Jaguariúna	Cinturão Orogênico do Atlântico, maiores altitudes em relação ao entorno, maior declividade em relação ao entorno.

Dc25	Itapira	Cinturão Orogênico do Atlântico, transição entre Dc23 e Dc33, dificuldades para classificar pelo tamanho reduzido
Dc33	Serra Negra	Cinturão Orogênico do Atlântico, alta densidade de drenagem, altitudes moderadas
Dc34	Monte Alegre do Sul	Cinturão Orogênico do Atlântico, maiores altitudes da área de estudo, altas declividades
Dc35	Lindóia	Cinturão Orogênico do Atlântico, maiores altitudes da área de estudo, altas declividades,

Quadro 6.3 – Organização das Conversão de Chaves de Interpretação, que foram, posteriormente, utilizadas para a elaboração da rede semântica.

Nesse procedimento, verificou-se certa dose de subjetividade na delimitação das Unidades Morfoesculturais, tendo em vista que são resultado do agrupamento dos padrões de formas semelhantes mapeados no 3º Táxon. Quando se trata das unidades regionais, esse

grau de subjetividade é mantido, fato constatado, por exemplo, pelas dificuldades de obtenção de dados para áreas nessa ordem de extensão territorial.

6.2.5 Classificação por Análise de Imagens Orientada a Objetos Geográficos (GEOBIA)

A análise orientada a objetos geográficos (GEOBIA) teve como ponto de partida, o algoritmo de segmentação multirresolução do *software* eCognition Developer 8 para gerar segmentos (objetos) que representem feições morfológicas homogêneas quanto a altitude e declividade. Em seguida, utilizou-se o conhecimento da área, adquirido pela análise exploratória (visual e quantitativa), para converter chaves de interpretação em atributos de uma rede semântica composta por funções de pertinência (lógica fuzzy), limiares e outros elementos usados pelo sistema para efetuar a classificação. Os resultados foram alcançados de maneira empírica e as etapas desse processo estão representadas no fluxograma a seguir:

Figura 6.25 – Fluxograma de Procedimentos Operacionais para a classificação por GEOBIA

As imagens Landsat 8, MDE SRTM e a Declividade (Variável Geomorfométrica) foram utilizados como dados de entrada para o modelo cognitivo. Foram realizados diversos testes com o algoritmo de Segmentação Multirresolução, com a avaliação visual dos resultados. A melhoria no traçado dos objetos foi realizada de forma empírica, considerando o conhecimento da área de estudo, parâmetros e resultados obtidos por trabalhos anteriores, bem como os pressupostos teóricos contidos nas referências bibliográficas.

No momento em que os resultados dessa etapa foram considerados satisfatórios, procedeu-se com a escolha das funções de pertinência e elaboração da rede semântica. Foi dedicada atenção especial aos atributos correspondentes aos objetos localizados na transição entre o Cinturão Orogênico e Bacia Sedimentar do Paraná. A partir da rede semântica, os objetos foram classificados e avaliados visualmente. Quando se obteve um resultado satisfatório nessa primeira abordagem, iniciou-se a etapa de avaliação por matriz de erro, e posteriores conclusões e considerações finais.

Conforme demonstrado no capítulo 4.8, o algoritmo de segmentação multirresolução, disponível no *software* eCognition Developer 8, pode ser utilizado para a obtenção de objetos com base nos seguintes parâmetros:

- Configuração da segmentação: ponderação de cada variável de entrada, *layers* temáticos
- Parâmetro de escala, que define o limiar de agrupamento dos critério de homogeneidade;
- Composição do critério de homogeneidade: forma (*shape*) e compacidade (*compactness*).

Durante os experimentos, os critérios de ponderação das variáveis de entrada (imagens Landsat, declividade, elevação e eventuais *layers* temáticos), *scale*, *shape* e *compactness* compuseram a segmentação. Em caso de insucesso na avaliação visual, os parâmetros eram alterados e o algoritmo, novamente executado. Este procedimento foi realizado diversas vezes até a obtenção de resultados consistentes, sendo utilizado apenas o critério qualitativo (BAATZ & SCHÄPE, 2000) para a avaliação. As figuras a seguir ilustram alguns dos testes realizados no sentido de se obter a configuração ideal dos parâmetros de segmentação multirresolução para a compartimentação das unidades geomorfológicas na área de estudo.

Na Figura 6.26, é possível observar que os segmentos apresentam tamanho bastante reduzido em relação às feições de interesse (morfoestruturas) mapeadas visualmente. Esta

característica se deve ao baixo valor de parâmetro de escala adotado, acarretando num baixo limiar de iteração dos critérios de homogeneidade em cada segmento.

Figura 6.26 – Exemplo de produto do algoritmo de segmentação multirresolução com *scale parameter*: 30; *shape*: 0.1; e *compactness*: 0.5

Mantendo os mesmos critérios de homogeneidade, mas alterando o parâmetro de escala, verificou-se que o tamanho dos segmentos aumentou significativamente, conforme verificado na Figura 6.27:

Figura 6.27 - Exemplo de produto do algoritmo de segmentação multirresolução com *scale parameter*: 120; *shape*: 0.1; e *compactness*: 0.5

Em seguida, mantendo-se, ainda, os mesmos valores referentes ao critério de homogeneidade, mas aumentando ainda mais o valor do parâmetro de escala, obteve-se um resultado cuja compartimentação se aproxima daquela realizada visualmente para as morfoestruturas, conforme se verifica na Figura 6.28.

Figura 6.28 - Exemplo de produto do algoritmo de segmentação multirresolução com *scale parameter*: 800; *shape*: 0.1; e *compactness*: 0.5

Diferentemente do parâmetro de escala, a alteração dos critérios de homogeneidade interferem nos contornos obtidos pela iteração dos dados de entrada. O critério de Cor / Forma são opostos, complementares e variam entre 0.1 e 0.9. Assim, quanto maior o valor do critério *Shape*, menor será a dependência da cor (valores espectrais) no algoritmo de segmentação. Quanto menor o valor desse critério, mais vinculados aos valores espectrais serão os objetos (TRIMBLE, 2011).

O critério de forma pode, ainda, ser subdividido em Compacidade e Suavidade, definidos pelo parâmetro *Compactness*, que também varia entre 0.1 e 0.9. Valores altos implicam em objetos compactos, ao passo que a situação inversa gera segmentos irregulares. Na situação representada pela Figura 6.29, a segmentação foi realizada com altos valores dos parâmetros Forma e Compacidade, gerando objetos compactos.

Figura 6.29 – Exemplo de objetos gerados pelo algoritmo Segmentação Multirresolução com *Scale parameter*: 100; *Shape*: 0.9; *Compactness*: 0.9

Em contrapartida, na Figura 6.30, verifica-se um exemplo de segmentação multirresolução realizada com baixo valor de compacidade, acarretando em objetos irregulares. No caso em tela, merece destaque, também, o fato de haver certo padrão na forma dos objetos, sendo que mais a leste da área, há ocorrência de um número maior de segmentos, além de apresentarem tamanho reduzido. Isto se deve à maior heterogeneidade quanto à elevação e declividade (variáveis de entrada do algoritmo) nesta área correspondente ao Planalto. Mais a oeste, na área da Bacia Sedimentar, ocorrem objetos maiores e com menos irregularidades, fato visível causado pelas características de seus atributos.

Figura 6.30 – Exemplo de objetos gerados pelo algoritmo Segmentação Multirresolução com *Scale Parameter*: 100; *Shape*: 0.5; *Compactness*: 0.1

Como produto dos diversos testes realizados, obtiveram-se parâmetros satisfatórios para os níveis segmentados, conforme demonstrado nos itens subsequentes. Posteriormente à etapa de segmentação, procedeu-se com a classificação a partir da rede semântica. Os limiares e funções de pertinência foram estabelecidos de acordo com os atributos obtidos das chaves de interpretação. Pequenos ajustes foram necessários para o refinamento da classificação.

As constatações das etapas de análise exploratória e conversão de chaves de interpretação forneceram informações quanto ao potencial de cada variável em separar as classes no nível morfoestrutura.

6.2.6 Avaliação quantitativa da classificação

A avaliação de acurácia foi realizada a partir da comparação entre a classificação gerada por GEOBIA e o Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo (ROSS & MOROZ, 1997) adotado como dado de referência.

6.2.6.1 Etapa preliminar de avaliação da acurácia da classificação

Para avaliação quantitativa da classificação, em torno do limite mapeado por ROSS & MOROZ (1997) para a transição entre Cinturão Orogênico do Atlântico e Bacia Sedimentar do Paraná, foi delimitada uma área de 3km para leste e 3km para oeste, denominada faixa de testes da classificação.

Figura 6.31 – Alocação de pontos aleatórios sobre a faixa de testes da classificação.

Sobre a faixa de testes, foram lançados 200 (duzentos) pontos aleatoriamente. A verificação de acurácia foi realizada a partir da comparação entre as informações mapeadas por GEOBIA, com o mapeamento de ROSS & MOROZ (1997). O resultado desse processo gerou a matriz de erro representada abaixo:

Posteriormente à elaboração da matriz de erro, foram calculadas as medidas de acurácia global, do produtor e usuário. O valor de acurácia global foi de 79,5%, considerando que 159 pontos lançados sobre a área, foram classificados corretamente, quando comparados aos resultados do Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo (ROSS & MOROZ, 1997).

O resultado de acurácia global pode ser considerado aceitável, no entanto, o mapeamento realizado foi refinado por campanhas de campo, que aumentaram significativamente as medidas de acurácia, conforme relatado a seguir.

6.2.6.2 Trabalho de campo para verificação de áreas

No intuito de aumentar a acurácia da classificação, foram lançados, aleatoriamente, 100 (cem) pontos sobre as áreas de intersecção entre a classificação gerada por GEOBIA e ROSS & MOROZ (1997). Estas, correspondem a cerca de 23% do total da área de estudo.

Sobre esta faixa de intersecção, foram realizadas duas campanhas de campo. A primeira para reconhecimento das características área de estudo e na segunda, as amostras aleatórias foram verificadas para subsidiar a edição manual do traçado entre Cinturão Orogênico do Atlântico e Bacia Sedimentar do Paraná.

O mapa a seguir apresenta a distribuição das amostras na faixa de intersecção bem como o resultado da verificação de campo. O traçado em vermelho representa o resultado da edição manual do limite entre as unidades elaborado posteriormente ao levantamento de campo.

Figura 6.32 – Alteração do limite entre Cinturão Orogênico do Atlântico e Bacia Sedimentar do Paraná elaborado posteriormente ao trabalho de campo (em vermelho)

Durante o campo, verificou-se, ainda, que a compartimentação do Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo (ROSS & MOROZ, 1997) apresentou poucos erros de comissão e omissão, atingindo acurácia global de 82,1%.

6.2.6.3 Etapa complementar de verificação da acurácia

Posteriormente à edição manual, procedeu-se com uma nova avaliação de acurácia da classificação. Para tanto, foi utilizada a mesma faixa de teste da classificação, seguido de nova amostragem de 200 (duzentos) pontos aleatórios lançados sobre a área para a elaboração de uma nova matriz de erro.

Com este procedimento, buscou-se eliminar eventuais inconsistências na classificação, bem como mensurar o ganho obtido com a complementação das informações de campo.

7 RESULTADOS

7.1 Segmentação Multirresolução do “Nível Água”

A segmentação multirresolução partiu do nível geral para o mais detalhado, seguindo procedimento semelhante aquele aplicado por CAMARGO (2008) e FERNANDES (2013). Primeiramente, a segmentação foi realizada para separar corpos d’água, como o Reservatório Salto Grande e pequenos açudes, das áreas emersas.

Considerando o baixo valor de DN correspondente ao Infravermelho Próximo (Near Infrared – NIR), as bandas do Landsat 8 foram utilizadas para identificar corpos d’água na área de estudo. Assim, os dados de entrada para o algoritmo, bem como os parâmetros adotados encontram-se discriminados no quadro a seguir:

[-] Level Settings	
Level Name	Nível Água
[-] Segmentation Settings	
[-] Image Layer weights	1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 1, 1
Blue	1
DEM	1
Green	1
NIR	1
Red	1
Shaded	0
Slope	0
SWIR 1	1
SWIR 2	1
[+] Thematic Layer usage	No, No
Scale parameter	60
[-] Composition of homogeneity criterion	
Shape	0.2
Compactness	0.8

Quadro 7.1 – Parâmetros utilizados no algoritmo de segmentação multirresolução para o nível água

Os parâmetros foram adotados no sentido de adequar à realidade da área de estudo, sendo que a escala foi escolhida em função do tamanho dos reservatórios existentes. Como se buscou segmentar objetos condizentes com um baixo valor de DN na banda do infravermelho próximo, o critério de homogeneidade deveria ter baixa dependência da forma (*Shape*: 0.2).

7.2 Classificação do “Nível Água”

Nesta fase, foram obtidas apenas 2 (duas) classes: Reservatórios (de tamanhos diversos) e Terras Emersas. Optou-se pela manutenção do DN no formato *16-bit unsigned integer* por se tratar do dado original, conforme descrito no item 6.2.2.1e indicado na tabela abaixo:

Classes	Variáveis utilizadas	Atributos
Reservatórios	Banda 5 (Infravermelho Próximo – NIR)	Média do DN < 9070
Terras Emersas	-	Not Reservatórios

Tabela 7.1 – Atributos utilizados para separação de Reservatórios e Terras Emersas. O valor do DN indicado corresponde ao dado padrão das imagens Landsat 8, no formato *16-bit unsigned integer*.

O resultado do primeiro nível de classificação pode ser observado na Figura 7.1 – Resultado da classificação do “Nível Água”. A cor azul representa os reservatórios, ao passo que o ocre, as terras emersas., com destaque para o Reservatório Salto Grande, bem evidenciado pelos procedimentos de classificação por GEOBIA. Ademais, foram mapeados pequenos açudes espalhados pela área de estudo. Num procedimento de interpretação visual, dificilmente poderia se obter tal nível de detalhe na classificação de corpos d’água.

Figura 7.1 – Resultado da classificação do “Nível Água”. A cor azul representa os reservatórios, ao passo que o ocre, as terras emersas.

CAMARGO (2008) utilizou operador fuzzy AND para utilizar, além dos dados de imagens multiespectrais, as informações de elevação. Considerando o fato de o Reservatório Salto Grande se tratar do nível de base local, inicialmente, para a segmentação, foram utilizados os dados de elevação. No entanto, testes realizados sem esta variável, não apresentaram significativas alterações no traçado do reservatório, já que não há grandes corpos d'água em níveis altimétricos tão distintos.

7.3 Segmentação Multirresolução do “Nível Morfoestrutura (1º Táxon)”

Em relação à divisão de Água e Terras Emersas, o Nível Morfoestrutura (1º Táxon) corresponde a um patamar inferior, cujos procedimentos foram realizados apenas sobre os objetos correspondentes às Terras Emersas. No processo iterativo do algoritmo de segmentação multirresolução, uma das premissas do processo, é o respeito às bordas de segmentos do nível superior, eliminando a possibilidade de *pixels* classificados como Reservatório serem segmentados em novos objetos.

Para este nível, foram utilizados, como dados de entrada para o algoritmo, o MDE SRTM e a declividade. Conforme verificado no Mapa de Integração de Dados, dentre as variáveis organizadas, a declividade apresentou melhores possibilidades de separação das classes mapeadas visualmente, levando à adoção de um peso maior (1.5), conforme demonstrado no quadro a seguir:

Segmentation Settings	
Image Layer weights	0, 1, 0, 0, 0, 0, 1.5, 0, 0
Blue	0
DEM	1
Green	0
NIR	0
Red	0
Shaded	0
Slope	1.5
SWIR 1	0
SWIR 2	0
Thematic Layer usage	No, No
Scale parameter	400
Composition of homogeneity criterion	
Shape	0.45
Compactness	0.66

Quadro 7.2 - Parâmetros utilizados no algoritmo de segmentação multirresolução para o nível morfoestrutura (1º Táxon).

Nesta etapa, os dados de DN do Landsat 8 e Relevô Sombreado não foram utilizados como variáveis de entrada, restringindo-se, apenas, para visualização. O parâmetro de escala adotado foi 400, por se tratar de um nível de vasta extensão territorial. Os critérios de homogeneidade foram *Shape*: 0.45; e *Compactness*: 0.66, pois na maior parte da área de estudo, os objetos tendem a ser compactos (como verificado na maior parte da Depressão Periférica) e com média dependência da forma.

7.4 Classificação do “Nível Morfoestrutura (1º Táxon)”

Num primeiro momento, após a análise visual, acreditava-se que as funções de pertinência e limiares seriam baseadas em medidas de declividade. No entanto, a elaboração de gráficos *boxplot* e dispersão permitiram a identificação de um nítido desnível altimétrico entre as unidades em questão. Assim, procedeu-se com esta fase do trabalho utilizando-se as variáveis e atributos discriminados a seguir:

Classes	Variáveis utilizadas	Atributos
Cinturão Orogênico do Atlântico	- MDE SRTM - Declividade	- Média e Desvio Padrão - Média e Desvio Padrão
Bacia Sedimentar do Paraná	- MDE SRTM - Declividade	- Média e Desvio Padrão - Média e Desvio Padrão

Tabela 7.2 – Variáveis e atributos utilizados na Classificação do Nível Morfoestrutura (1º Táxon).

As variáveis discriminadas na tabela acima e respectivos atributos foram utilizados para elaboração de funções de pertinência *fuzzy*. Caso a descrição da classe não gerasse resultados visualmente satisfatórios, os valores de atributos, bem como as curvas da função de pertinência eram alterados. A figura a seguir ilustra a hierarquia existente entre o nível da morfoestrutura, em relação ao nível água, segmentado e classificado nos itens 7.1 e 7.2.

Figura 7.2 – Hierarquia de classes representada no ambiente do eCognition Developer 8

O resultado da classificação dos objetos no Nível Morfoestrutura (1º Táxon) está ilustrado na Figura 7.3 de maneira preliminar e consolidado no ANEXO 2. Os atributos das classes empregam o operador AND, pois todas as funções de pertinência devem ser atendidas simultaneamente para cada classe.

Figura 7.3 – Resultado obtido pela Segmentação Multirresolução do “Nível Água” posterior classificação das Unidades Morfoestruturais. Em verde, está representada a Bacia Sedimentar do Paraná, ao passo que as áreas em lilás correspondem ao Cinturão Orogênico do Atlântico.

Na área destacada pela elipse cinza, constatou-se em campo e em CPRM (2004), a ocorrência de rochas da Formação Serra Geral. Esta característica gerou maiores altitudes e taxas de declividade média em relação ao entorno. O fato de o critério de separabilidade principal ser os dados de elevação, oriundos do MDE SRTM, a princípio, foi um problema, pois tornava-se semelhante às características dos vizinhos correspondentes ao Planalto Atlântico. No entanto, a solução encontrada foi a adoção do desvio padrão da declividade, que se apresenta com menores valores, em relação às áreas localizadas mais a leste.

As funções de pertinência produziram resultados satisfatórios quanto à atribuição de características aos objetos da segmentação, no entanto, foram elaboradas de maneira heurística e vinculadas ao conhecimento técnico humano da área de estudo. Em caso de desconhecimento total das características do meio físico da área de estudo, não é possível afirmar que a análise exploratória (visual e estatística) seja suficiente para gerar uma célere conversão de chaves de interpretação em atributos de uma rede semântica.

Planície do Rio Camanducaia é um bom exemplo de subjetividade na interpretação dos mapeamentos geomorfológicos, já que não foi mapeado por ROSS & MOROZ (1997), mas está delimitada nos mapeamentos elaborados pelo CPRM (2014) e RADAMBRASIL (1983). Apesar de ter sido identificada nos experimentos com o algoritmo segmentação multirresolução, não foi representada no produto final por conta da ênfase dada à transição das morfoestruturas Cinturão Orogênico do Atlântico e Bacia Sedimentar do Paraná.

No mapeamento de morfoestruturas no estado do Rio de Janeiro, FERNANDES (2013) obteve como variável de separabilidade a média da declividade, critério fundamental para separação de depósitos sedimentares e faixas de dobramentos remobilizados. Nos experimentos realizados, no entanto, verificou-se que a variável ideal para compartimentação da transição entre Cinturão Orogênico e Bacia Sedimentar foi a média da elevação.

7.5 Tentativas de Classificação para o “Nível Morfoescultura (2º Táxon)” e “Nível Padrões de Formas Semelhantes (3º Táxon)”

Tentativas realizadas para segmentação de padrões de formas semelhantes, que correspondem ao modelado do relevo. A partir da identificação dessas unidades, tentaria-se definir as chamadas “variações fisionômicas” consideradas como Unidades de Relevo Regional (ROSS & MOROZ, 1997), denominadas pelo RADAMBRASIL (1983) como Unidades Geomorfológicas.

Inicialmente, identificou-se uma dificuldade nesta etapa por conta da segmentação no nível de Padrões de Formas Semelhantes. Na metodologia utilizada, as unidades regionais, são produto do agrupamento deste nível de informação.

Na área de estudo, ocorrem unidades com tamanho variável, fato que dificultou no estabelecimento de um parâmetro de escala abrangente e que permitisse iterações adequadas para esse nível taxonômico. Outra implicação no mapeamento dessas unidades foi a variável de entrada para o modelo cognitivo. No mapeamento de ROSS & MOROZ (1997), como critério para a compartimentação do modelado, adotou-se a Matriz de Dissecação do Relevo, que considera a Dimensão Interfluvial (ou Densidade de Drenagem) e o Grau de Entalhamento dos Vales. Até o momento, não foi possível estabelecer um método adequado para tal representação. SAMPAIO & AUGUSTIN (2014) apresentam procedimentos com enorme potencial para o suprimento desta necessidade. Outro obstáculo para o mapeamento das unidades regionais foi o certo grau de subjetividade no agrupamento dos padrões de formas anteriormente mapeados.

7.6 Análise de incertezas e acurácia da classificação

A comparação entre o Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo (ROSS & MOROZ, 1997) com a classificação elaborada por GEOBIA gerou-se uma matriz de erro, utilizada para verificação da acurácia do produto, conforme segue:

MATRIZ DE ERRO				
		Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo (ROSS & MOROZ, 1997)		
		Cinturão Orogênico do Atlântico	Bacia Sedimentar do Paraná	Total Linha
Classificação GEOBIA (KAWATA, 2014)	Cinturão Orogênico do Atlântico	98	22	120
	Bacia Sedimentar do Paraná	19	61	80
	Total Coluna	117	83	200

Tabela 7.3 – Matriz de erro elaborada para a transição entre Cinturão Orogênico do Atlântico e Bacia Sedimentar do Paraná.

A acurácia global da classificação nesta primeira etapa foi de 79,5%, já que o total de amostras classificadas corretamente foi de 159 (98=Cinturão; 61=Bacia). A medida de acurácia do Produtor, para a unidade Cinturão Orogênico, foi de 83,8%; e para a Bacia Sedimentar, de 73,5%. No caso do cálculo da acurácia do usuário, verificou-se 81,7% para a primeira e 76,3% para a segunda. A tabela a seguir representa a síntese dessas medidas. Os dados indicam para

MEDIDAS DE ACURÁCIA	
Acurácia Global	79.5%
Acurácia do Produtor	
Cinturão Orogênico	83.8%
Bacia Sedimentar	73.5%
Acurácia do Usuário	
Cinturão Orogênico	81.7%
Bacia Sedimentar	76.3%

Tabela 7.4 – Cálculos de Acurácia Global, do Produtor e do Usuário.

Posteriormente à realização de trabalho de campo e edição manual do limite definido entre as unidades, verificou-se novamente a da acurácia na classificação, tendo se constatado uma significativa melhora. O resultado dessa segunda fase foi representado na tabela a seguir:

MATRIZ DE ERRO APÓS EDIÇÃO MANUAL				
		Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo (ROSS & MOROZ, 1997)		
		Cinturão Orogênico do Atlântico	Bacia Sedimentar do Paraná	Total Linha
Classificação GEOBIA (KAWATA, 2014)	Cinturão Orogênico do Atlântico	99	14	113
	Bacia Sedimentar do Paraná	0	87	87
	Total Coluna	99	101	200

Tabela 7.5 – Matriz de erro elaborada posteriormente à realização dos levantamentos de campo e edição manual.

A acurácia global obtida por esta nova classificação foi de 93,0%, ou seja, os levantamentos de campo seguidos de edição manual acresceram 13,5% na medida de acurácia global em relação ao mapa de referência. Observou-se, ainda, um significativo crescimento na acurácia da classificação para as amostras referentes à Bacia Sedimentar do Paraná. A Tabela 7.6 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** sintetiza as informações obtidas para o mapa nessa nova etapa de classificação.

MEDIDAS DE ACURÁCIA	
Acurácia Global	93.0%
Acurácia do Produtor	
Cinturão Orogênico	100.0%
Bacia Sedimentar	86.1%
Acurácia do Usuário	
Cinturão Orogênico	87.6%
Bacia Sedimentar	100.0%

Tabela 7.6 – Medidas de acurácia global, do produtor e do usuário calculadas posteriormente aos levantamentos de campo e edição manual.

A acurácia do produtor de 100% indica que todas as amostras mapeadas como Cinturão Orogênico do Atlântico, posteriormente ao campo, foram identificadas nessa mesma unidade pelo mapa de referência. Por outro lado, a acurácia do usuário de 100% para a Bacia Sedimentar, indica que todas as amostras lançadas (no mapa de referência) para esta unidade foram mapeadas pela classificação por GEOBIA.

8 CONCLUSÕES

A análise desenvolvida no presente trabalho permite concluir pela viabilidade de utilização da GEOBIA para mapeamentos geomorfológicos, no caso da área de estudo, na compartimentação de morfoestruturas. Procedimentos simples de estatística descritiva na análise quantitativa já oferecem soluções relevantes para a análise quantitativa do relevo e podem ser utilizadas para a conversão de chaves de interpretação em atributos e funções de pertinência na rede semântica e GEOBIA.

A análise exploratória mostrou-se um procedimento imprescindível para a obtenção de bons resultados de classificação por GEOBIA, tendo em vista que maximiza as potencialidades dos algoritmos matemáticos, agregando bagagem conceitual ao modelo cognitivo. Os testes realizados resultaram num produto condizente, no entanto, a área de estudo já é bastante conhecida e mapeada. No caso da aplicação dessas técnicas em áreas ainda desconhecidas, é importante a realização de mapeamentos de grande escala e coleta de dados primários para subsidiar a elaboração da rede semântica, proporcionando maior confiabilidade ao produto final.

A impossibilidade de compartimentação do modelado inviabilizou a identificação de feições lineares da legenda, como escarpas, hog backs, etc. Ademais, as dificuldades encontradas no mapeamento de modelados, implicou no insucesso do mapeamento das unidades morfológicas regionais, como o Planalto Lindóia/Serra Negra, Planalto de Jundiá, Depressão do Médio Tietê e Depressão do Mogi-Guaçu, restringindo a GEOBIA ao mapeamento das Morfoestruturas. Muitas das chaves de interpretação não puderam ser convertidas para atributos da rede semântica por limitação operacional, acarretando em sua simplificação. Juntamente com os parâmetros ideais para segmentação, este é um dos principais gargalos da GEOBIA.

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Todas as etapas de mapeamento por GEOBIA, cada uma com sua especificidade, demonstraram ampla validade e possibilidades de aplicação em projetos de mapeamento de relevo. No entanto, devem ser utilizadas com cautela, já que existem muitas formas de representação passíveis de discussão e complementação, sobretudo quanto à integração de dados, estrutura superficial da paisagem, dinâmica evolutiva do relevo, cronologia de formas e materiais.

Apesar das muitas potencialidades oferecidas, para o mapeamento geomorfológico, as técnicas utilizadas se prestam à representação de feições lineares, como cristas, lineamentos e escarpas de falha. Para tanto, é preciso desenvolver métodos e procedimentos específicos. Exemplos desse tipo de aplicação podem ser verificados em RODRIGUES (2010).

A altitude, como parâmetro para a o estabelecimento de regras de pertinência de uma rede semântica mostrou-se adequada para esta área de estudo, no entanto, é bastante variável ao longo da faixa de transição entre a Bacia Sedimentar do Paraná e o Cinturão Orogênico do Atlântico. É importante realizar experimentos semelhantes em diversas outras áreas teste para aferir a validade dos critérios utilizados neste e em outros trabalhos envolvendo GEOBIA.

A análise de uma base de dados, visual e quantitativa, a partir de diversos métodos foi um procedimento importante para a verificação das premissas acerca dos atributos da rede semântica. À medida que as técnicas de mapeamento avançar e permitirem o estudo em maiores escalas será necessário avaliar os resultados de maneira mais minuciosa, considerando diferentes métodos de reamostragem e detalhes das imagens e/ou dados de entrada para o modelo cognitivo. Os gráficos *Boxplot* e Dispersão das variáveis de entrada apresentaram resultados interessantes quando usados para buscar separadores que servem de limiares para as funções de pertinência e/ou regras de classificação da rede semântica. No entanto, nos testes realizados foram apenas os dados do DEM e Slope. Acredita-se que a busca pela representação de técnicas de representação das feições geomorfológicas tende a potencializar o GEOBIA. Esse quadro torna-se ainda mais amplo, quando se pensa na utilização de dados de representação do substrato (materiais) e processos (fisiologia da paisagem).

Apesar de ser uma constatação aparentemente óbvia, é válido registrar a imprescindibilidade do trabalho de campo para mapeamentos geomorfológicos, tanto na etapa de compartimentação ou interpretação, quanto na etapa final de verificação.

Semi-automatização da análise e interpretação preliminar de dados de sensoriamento remoto. Esse procedimento favorece a sistematização e uniformização de procedimentos para o mapeamento geomorfológico de vastas áreas.

Paralelamente, estudos envolvendo geotecnologias tendem a desenvolver metodologias diferentes para geração de dados de entrada que melhor representem as variáveis de interesse para um modelo de mapeamento geomorfológico. Exemplo da matriz de dissecação do relevo, que apesar de ser um conceito importante em várias escolas de mapeamento geomorfológico.

Os resultados ainda são muito variados para cada área. A transposição de chaves de interpretação para a rede semântica tende a ser realizada de forma heurística e caminhos diferentes podem levar a resultados semelhantes, fato que demonstra a persistente carga de subjetividade nos mapeamentos geomorfológicos. Tal fato é, até certo modo, esperado, dada a incapacidade dos sistemas computacionais em distinguir situações, bem como bagagem conceitual como o cérebro humano, sendo meramente replicador do conhecimento representado na rede semântica. Outra perspectiva promissora dessa abordagem é o desenvolvimento em estudos na elaboração de rede semântica, que mesmo sendo elaborada de forma heurística, pode ainda receber contribuições no sentido de sistematizar sua elaboração e condução de etapas.

Resta ainda, o desenvolvimento de pesquisas na área de bibliotecas de representação, na qual os pesquisadores podem catalogar o comportamento espectral e dielétrico dos alvos a serem mapeados. No caso de estudos de uso da terra, nos quais se utiliza as imagens multiespectrais ou hiperespectrais, estudos de comportamento de alvo já são conduzidos há certo tempo, mas para mapeamento geomorfológico, ainda são bastante diminutos.

O tema pode ainda amadurecer muito quanto a sistematização conceitual de metodológica. Considerando a juventude da matéria, são de grande interesse científico, projetos de mapeamento regional para que haja o acúmulo do conhecimento empírico. Ademais, é desejável, que o tema GEOBIA seja abordado e apresentado em congressos e periódicos científicos para favorecer o avanço teórico e metodológico desse tema relevante e que pode oferecer contribuições para a ciência brasileira, internacional e até mesmo interplanetária.

Realizando um levantamento teórico e metodológico acerca de todo o projeto SRTM, verificou-se que há alterações na distribuição dos dados ao longo de todo o projeto. É importante conhecer as limitações e potencialidades das técnicas associadas às geotecnologias, já que pequenos erros no momento da aquisição dos dados, podem se propagar gradativamente com as diversas análises e dados secundários que são realizadas posteriormente. Nesse contexto, deve se destacar o papel dos trabalhos de campo para aferir com maior grau de certeza os resultados obtidos nos trabalhos de gabinete. No entanto, mesmo em campo, a identificação da transição entre Cinturão e Bacia foi uma tarefa complexa possivelmente, este gargalo pode ser solucionado com estudos focados no estabelecimento de critérios para padronizar a identificação de feições típicas das unidades geomorfológicas

mapeadas. Ademais, como perspectiva de trabalhos futuros, pode se pensar em métodos de representação dos indicadores de eficiência para a GEOBIA.

Variáveis associadas à aquisição dos dados podem, também, alterar os resultados, tornando desejável a realização de comparações entre fontes diferentes de dados, com diferentes métodos de interpolação, amostragem de dados e escalas de análise. Exemplo: SRTM V1, V2 e V3, ASTER, Cartas topográficas do IBGE, IGC, Emplasa, LiDAR, entre outros. Existem diversas variáveis relacionadas ao processo de aquisição dos dados que podem ser ponderadas para avaliação do resultado final. Essa é uma tarefa árdua, mas que poderá contribuir imensamente para o conhecimento aprofundado das potencialidades e fragilidades do método.

10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABARCA, M. A. A. "Lineament extraction from Digital Terrain Models – Case Study San Antonio Del Sur Area, South-Eastern Cuba". Dissertação de Mestrado. *International Institute for Geo-information Science and Earth Observation*. Enschede, Netherlands. 2006
- ABREU, A. A.. "A Teoria Geomorfológica E Sua Edificação: Análise Crítica" in: Revista Brasileira de Geomorfologia, ano 4, n. 2, 2003. p.51-67
- AB' SABER, A. N. "Regiões de Circundesnudação Pós Cretácea no Planalto Brasileiro" in: Boletim paulista de Geografia, n 1, São Paulo, 1949, p. 1-21
- AB' SABER, A. N. "A Depressão Periférica Paulista: Um Setor das Áreas de Circundesnudação Pós-Cretacea na Bacia do Paraná" in: Geomorfologia n. 15, São Paulo, 1969, p. 1-26
- AB'SABER, A. N. "Problemas Do Mapeamento Geomorfológico No Brasil" in: Geomorfologia n.6. Instituto de Geografia da Universidade de São Paulo. São Paulo, SP, 1969. p.1-16
- ALMEIDA, A. B.; DOMINGUES, J. M. L.; BARBOSA, J. S. F.. "Modelo Numérico De Terreno Como Ferramenta Para A Compreensão Da Fisiografia Da Zona Costeira" in: II Congresso sobre Planejamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa – IX Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário – II Congresso do Quaternário dos Países de Língua Ibérica. Recife, PE, 2003
- ANTUNES, A.F.B.; LINGNAU, C. "Uso de índices de acurácia para avaliação de mapas temáticos obtidos por meio de classificação digital" In: III Congresso e feira para usuário de geoprocessamento, 1997, Curitiba, 1997
- BAATZ, M. & SCHÄPE, A. "Multiresolution segmentation: an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation". In: XII Angewandte Geographische Informationsverarbeitung, Wichmann-Verlag, Heidelberg, 2000.
- BARBOSA, A. P.; SILVA, A. F. da; ZIMBACK, C. R. L.. "Modelos Numéricos Do Terreno Obtidos Por Diferentes Métodos Em Cartas Planialtimétricas" in: Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental v.16 n.6. Campina Grande, PB, UAEEA/UFCG, 2012. p. 655-660
- BARBOSA, M. E. F. & FURRIER, M.. "Uso Do Modelo Numérico De Terreno (MNT) Para Avaliação De Neotectônica No Litoral Sul Do Estado Da Paraíba: Estudo De Caso Da Bacia

Hidrográfica Do Rio Guruij, Brasil” in: Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR, Curitiba, PR, 30 de abril a 5 de maio, 2011 p.3545

BARROS, M. V. F.; POLIDORO, M.; TAKEDA, M. M. G.. “Geração De Modelo Tridimensional Através De Dados Do *Shuttle Radar Topography Mission* Para Subsídio No Planejamento Urbano E Estudos Geomorfológicos” in: VIII Encontro Nacional da ANPEGE. 28 de setembro a 02 de outubro. Curitiba, PR, 2009

BARROS, R. S. & CRUZ, C. B. M. "Avaliação da altimetria do modelo digital de elevação do SRTM". In: XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13, 2007. Florianópolis.p.1243-1250

BIAS, E. de S.; RIBEIRO, R. J. da C.; BAPTISTA, G. M. de M.; BERNARDI, J. V. E.. “Avaliação Da Exatidão Do MDE Obtido Por Meio Do SRTM E Pelas Cartas Do IBGE Na Escala 1:100.000” Revista Brasileira de Cartografia n.63/01, 2010

BITTENCOURT, G. Inteligência artificial: ferramentas e teorias. Florianópolis/SC: Editora da UFSC, 2006. 371 p.

BLASCHKE, T. “Object Based Image Analysis: A new paradigm in remote sensing?” in: ASPRS 2013 Annual Conference. Baltimore, Maryland, 2013

BLASCHKE, T.; GLÄSSER, C.; LANG, S. “Processamento de imagens num ambiente integrado SIG / Sensoriamento Remoto – Tendências e consequências” in: BLASCHKE, T. & KUX, H. Sensoriamento remoto e SIG avançados. 2ª Edição. Oficina de Textos. São Paulo, 2007

BLASCHKE, T., STROBL, J. “What's wrong with pixels? Some recent developments interfacing remote sensing and GIS. GIS” in: Zeitschrift für Geoinformationssysteme 14 (6), 12-17, 2001.

BRUCH, A. F.; GRUBER, N. L. S.; HANSEN, M. A. F..“Construção E Representação De Modelos Numéricos Do Terreno No SIG Spring Para O Relevô Da Sub- Bacia Hidrográfica Do Arroio João Dias, Minas Do Camaquã-RS” in: 12 Encuentro de Geógrafos de America Latina, Montevideo, Uruguay. 3 a 7 de abril, 2009

CÂMARA, G. & MONTEIRO, A. M. V..“Conceitos Básicos Em Ciência Da Geoinformação” in: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V..Introdução à Ciência da Geoinformação. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. São José dos Campos, 2001

CAMARGO, F. F. "Análise Orientada A Objeto Aplicada Ao Mapeamento De Unidades Geomorfológicas A Partir De Dados Aster/Terra" Dissertação de Mestrado. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos, 2008

CAMARGO, F. F.; ALMEIDA, C.M.; COSTA, G.A.O.P.; FEITOSA, R.Q.; OLIVEIRA, D.A.B.; HEIPKE, C.; FERREIRA, R.S. "An open source object-based framework to extract landform classes". In: Expert Systems with Applications 39 (2012) 541–554

CHAPLOT, V. DARBOUX, F.; BOURENNANNE, H.; LEGUÉDOIS, S.; SILVERA, N.; PHACHOMPHON, K.. "Accuracy of interpolation techniques for the derivation of digital elevation models in relation to landform types and data density" in: Geomorphology , 2006

CHRISTIAN, C. S. & STEWART, G. A. "General report on survey of Katherine-Darwin region". Land Research Series n 1. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization. Melbourne, 1946

COLTRINARI, L. "Cartas Geomorfológicas" in. Revista Orientação, Instituto de Geografia nº5 – USP . Outubro. São Paulo 1984

COLTRINARI, L. "Cartografia geomorfológica detalhada: a representação gráfica do relevo entre 1950-1970" in: Revista Brasileira de Geomorfologia v.12, nº3, 2011, p. 121-130

CONGALTON, R. "A review of assessing the accuracy of classification of remotely sensed data" in: Remote Sensing of Environment n. 37, p. 35 - 46, 1991

CONGALTON, R "Accuracy assessment and validation of remotely sensed and other spatial information" in: International Journal of Wildland Fire, 2001, 10, 321–328

CONGALTON, R. G.; GREEN, K. "Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices". Boca Raton: Lewis Publishers, 1999. 137 p.

CPRM – Serviço Geológico do Brasil "Mapa Geológico do Brasil ao Milionésimo – Folha SF23-Rio de Janeiro". Programa Geologia do Brasil. MME. 2004

CPRM – Serviço Geológico do Brasil "Geodiversidade do Estado de São Paulo" Programa Geologia do Brasil – Levantamento da Geodiversidade. São Paulo, 2010

DE BIASI, M "A carta clinográfica: os métodos de representação e sua confecção" in: Revista do Departamento de Geografia-FFLCH-USP. São Paulo, 1992

DEMEK, J “Generalization of Geomorphological Maps” In: DEMEK, J ed. Progress made in Geomorphological mapping Brno, Proceedings of the IGU Commission on applied geomorphology, 1967

DRAGUT, L; BLASCHKE, T. “Automated classification of landform elements using object-based image analysis” in: Geomorphology 81. P330-344, 2006

EVANS, D. L. “Geologic process studies using Synthetic Aperture Radar (SAR) data”. Episode 15 n°1, 1992.p 21-3

FARR, T. G., et al. (2007), The Shuttle Radar Topography Mission, Rev. Geophys., 45, RG2004, doi:10.1029/2005RG000183.

FELGUEIRAS, C. “Modelagem Numérica De Terreno” in: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V..Introdução à Ciência da Geoinformação. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. São José dos Campos, 2001

FERNANDES, P. J. F. “Dados SRTM e derivados no mapeamento geomorfológico regional”, 2013, 119p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013 disponível em <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3ELG8M2>>

FLORENZANO, T. G. Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais. São Paulo: Oficina de Textos, 2008

GASTÃO, F. G. da C. & MAIA, L. P..”O Uso De Dados Da Missão SRTM E Sedimentológicos Nos Estudos De Geomorfologia E Padrões De Drenagem Na Região Dos Lençóis Maranhenses” in: Revista Brasileira de Cartografia n.62/02, 2010 p.155-168

GRANGER, G. G. “A Ciência e as Ciências”. Tradução de Roberto Leal Ferreira. Editora Unesp, São Paulo, 1994

GROHMANN, C. H.. “Análise Digital De Terreno Do Centro-Leste Brasileiro”. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências – IGc – USP. São Paulo, SP, 2008

GROHMANN, C. H.; RICCOMINI, C.; STEINER, S. dos S.. “Aplicações Dos Modelos De Elevação SRTM Em Geomorfologia” in: Ver. Geogr.Acadêmica v.2 n.2, 2008.p.73-83

GROHMANN, G.; KROENUNG, G; STREBECK, J. “Filling SRTM Voids: The Delta Surface Fill Method” Photogrammetric Engineering & Remote Sensing March 2006 p. 213-216

HALL, O. ; FARLONI, G.; BRAS, R. L. "Characterization and Qualification of Data Voids in the Shuttle Radar Topography Mission Data" in: IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, n.2, v.2, April, 2005. P.177-181

HAY, G.J. & CASTILLA, G. "Object-Based Image Analysis: strengths, weakness, opportunities and threats (SWOT)" in: OBIA The internal Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2006

HAYDEN, R. S. "Geomorphological mapping". In: SHORT, N. M.; BLAIR. Jr., R W. (Ed.). Geomorphology from space: a global overview of regional landforms. Washington, DC: NASA, 1986."

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. "Manual Técnico de Geomorfologia". Manuais Técnicos em Geociências, n.5. Rio de Janeiro, RJ, 2009

IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. "Manual de fundamentos cartográficos e diretrizes gerais para elaboração de mapas geológicos, geomorfológicos e geotécnicos". Secretaria da ciência, tecnologia e desenvolvimento econômico. Programa de desenvolvimento de recursos minerais – PRÓ-MINÉRIO. São Paulo, 1989

KAWAKUBO, F. S.; MORATO, R. G.; CAMPOS, K.C.; LUCHIARI, A.; ROSS, J.L.S. "Caracterização empírica da fragilidade ambiental utilizando geoprocessamento". In: Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE, p. 2203-2210

KAWAKUBO, F. S. "Avaliação da Dinâmica do Uso da Terra no Município de São Félix do Xingu (Pará) Utilizando Imagens Multitemporais do Satélite Landsat TM e ETM+". In: EPOG - Encontro de Pós-graduandos FFLCH-USP. São Paulo, 2009

KEYDEL, W. "Present and Future Airborne and Space-borne Systems".In Radar Polarimetry and Interferometry. Educational Notes RTO-EN-SET-081bis, Paper 13. Neuilly-sur-Seine, France: RTO, 2007. p. 13-1 – 13-28. Disponível em: <http://www.rto.nato.int/abstracts.asp>

KLIMASZEWSKI, M.. "The principles of geomorphological mapping in Poland" in: Problems of Geomorphological mapping. Geographical Studies n. 46, Warszawa, 1963

KLIMASZEWSKI, M. "Detailed geomorphological maps" in: ITC Journal, Academy of Science, Kraków, Poland, 1982, pp.265-271

KURIHARA, K., MYERS, W. L., PATIL, G.P. "Relationship of Population and Land Cover Pattern Based on Remote Sensing Data Using Echelon Analysis. CommunityEcology", V.1, 2000. p 103-122.

LEAL, P. R. G.. "Controle De Qualidade Em Cartografia – Proposta Metodológica Para Avaliação De Cartas Topográficas Do Mapeamento Sistemático Nacional". Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Florianópolis, SC, 2007.

LOBÃO, J. S. B. & VALE, R. de M. C. "Aplicação do MDT/SRTM/NASA Para Detalhamento Geomorfológico no Semi-Árido" in: Anais III Simpósio Regional de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto. Aracaju, SE. 25 a 27 de outubro. 2006

LOPES, E. E.; RIEDEL, P, S.; VIDOTTI, M.; MERINO, E. R.. "Análise De Modelo Numéricos De Terreno Para Modelos Geomorfológicos", VI Simpósio Nacional de Geomorfologia/Regional Conference on Geomorphology. IAG, 6 a 10 de Setembro, Goiânia-GO, 2006

MARTINS, E. do S. F. "Avaliação da Exatidão Cartográfica de Dados SRTM e Atualização da Carta Plani-Altimétrica Salinópolis-NE do Pará" Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica. Instituto de Geociências. Universidade Federal do Pará. Belém, 2010

MIRANDA, E. E. de; (Coord.). **Brasil em Relevo**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 24 mar. 2013.

MORATO, R. G.; KAWAKUBO, F.S.; HAYAKAWA, E. H.; MACHADO, R.P.P. "Análise da expansão urbana por meio de composições coloridas multitemporais" In: Mercator - Revista de Geografia da UFC, vol. 10, núm. 22, maio-agosto, 2011, pp. 221-231

NOVACK, T. Classificação da cobertura da terra e do uso do solo urbano utilizando o sistema InterIMAGE e imagens do sensor QuickBird. 2009. 214 p. (INPE-16594-TDI/1580). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP8W/35UDRR5>>.

NOVO, E. M. L. de M. & PONZONI, F. J. "Introdução ao Sensoriamento Remoto" São Jose dos Campos, 2001.

ONGA, N.; SOUTO, R. N. V.; LEITE, T. O.; ZEILHOFER, P.; SCHWENK, L. M.. "Modelo Numérico De Terreno/Srtm Na Análise Para Estimar A Largura De Rede Hidrográfica" in: III

Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Recife, PE. 27 a 30 de julho, 2010. p. 001-006

OLIVEIRA, S.A.M. de; LIMA, S.P.S.; PEREIRA, L dos S.; RANGEL, M. C.; FASSARELA, R.A. "Digitalização e disponibilização dos filmes originais dos Projetos RADAM/RADAMBRASIL – Exemplos para aplicação" in: Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE p.8303

PIKE, R. J. "*Digital Terrain Modeling*" Encyclopedia of Social Measurement, Volume 1, Elsevier Inc, 2005p.669-675

PINTO, A. O. T.; CARVALHO JUNIOR, O. A. de; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T.; MARTINS, E. de S.; ARAUJO NETO, M. D. de. "Tratamento Dos Dados Da Missão Shuttle Radar Topography Mission E Comparação Com Modelos Digital De Terreno Gerado Por Interpolação De Cartas Topográficas" in: Espaço & Geografia v.7 n.1, Brasília, DF, 2004. p. 77-97

QUEIROZ NETO, J.P. "Sistemas de representação cartográfica empregados na região do Parateí, São Pedro e Marília" Colóquio Estudo e Cartografia de Formações Superficiais e suas aplicações em regiões tropicais. 1978

QUEIROZ NETO, J. P. & JOURNAUX, A. "Carta Geomorfológica de São Pedro-SP 1:50.000" in: Sedimentologia e Pedologia n.12, Instituto de Geografia, São Paulo, 1978,

RADAMBRASIL "Levantamento de Recursos Naturais v.32 – Folhas SF23/24 Rio de Janeiro/Vitória, Geologia, Geomorfologia, Pedologia, Vegetação e Uso Potencial da Terra" Projeto RADAMBRASIL. Rio de Janeiro, 1983

RABUS, B.; EINEDER, M.; ROTH, A. BAMLER, R. "The Shuttle Radar Topography Mission – A New Class Of Digital Elevation Models Aquired By Spaceborne Radar" in: ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing n 57, 2003. p.241-262

RODRIGUES, S. C. & BRITO, J. L. S.. "Mapeamento Geomorfológico De Detalhe – Uma Proposta De Associação Entre O Mapeamento Tradicional E As Novas Técnicas Em Geoprocessamento" in: Caminhos de Geografia – Revista Online. Programa de Pós-Graduação em Geografia. Instituto de Geografia. Universidade Federal de Uberlândia – UFU. Uberlândia, MG, 2000

RODRIGUES, T. L.; DEBIASI, P.; SOUZA, R. F. de. "Avaliação Da Adequação Dos Produtos ASTER GDEM No Auxílio Ao Mapeamento Sistemático Brasileiro" in: III Simpósio Brasileiro de

Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Recife, PE. 27 a 30 de julho, 2010. p. 001-005

RODRIGUES, T.G. "Análise da viabilidade de mapeamento Topográfico (escala 1:100.000) na região Amazônica através da integração de Informações altimétricas srtm-3 e Planimétrica palar: uma avaliação para a Serra dos Carajás (PA)". Dissertação de mestrado. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais– INPE. São José dos Campos, São Paulo, 2010

RODRIGUEZ, E.; MORRIS, C. H.; BELZ, J. E. "A Global Assessment of the SRTM Performace" in: Photogrammetric Engeneering and Remote Sensing, 72, 2006. p.249-260

ROSS, J. L. S. "Relevo Brasileiro uma nova proposta de classificação" in: Revista do Departamento de Geografia. V.4. Depto de Geografia. FFLCH-USP, São Paulo-SP, 1985

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.

ROSS, J. L. S. & M. I. C. "Mapa geomorfológico do estado de São Paulo Escala 1:500.000" Depto de Geografia – FFLCH-USP, São Paulo, SP, 1997

RUMBAUGH, J.; BLAHA, M.; PREMERLANI, W.; EDDY, F.; LORENSEN, W. "Modelagem e projetos baseados em objetos". Rio de Janeiro/RJ: Campus, 1994.

SALOMÉ, A.I.; DORSSER, J. van "Examples of 1:50.000 scale geomorphological maps od parto of the Ardennes" in: Z. Geomorpho. N.F. n26, 1982 p481-489

SAMPAIO, T. V. M; AUGUSTIN, C. H. R. R.; "Índice De Concentração Da Rugosidade: Uma Nova Proposta Metodológica Para O Mapeamento E Quantificação Da Dissecação Do Relevo Como Subsídio A Cartografia Geomorfológica." In: Revista Brasileira de Geomorfologia v.15 nº1, 2014

SANTOS, P. R. A.; GABOARDI, C.; OLIVEIRA, L. C. "Avaliação da Precisão Vertical dos modelos SRTM para a Amazônia". Revista Brasileira de Cartografia 58, 01, 2006. p.101-107

SANTOS, S. D. R.; HUINCA, S. C. M.; MELO, L. F. de S.; SILVA, M. T. Q. S. da; DELAZARI, L. S.. "considerações sobre a utilização do PEC (padrão de exatidão cartográfica) nos dias atuais" in: IIISimpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Recife, PE. 27 a 30 de julho, 2010. p. 001-005

SHARY, P. A.; SHARAYA, L. S.; MITUSOV, A. V. "Fundamental quantitative methods of land surface analysis". Geoderma, v. 107, n. 1-2, p. 1-32, 2002.

SMITH, L.C. "Emerging Applications of Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) in Geomorphology and Hydrology" In: Annals of the Association of American Geographers Volume 92, Issue 3, pages 385–398, September 2002

SOUZA JUNIOR, F.A. de & PRADO, R.L. do "Georreferência de imagens SLAR geradas pelo Projeto RADAMBRASIL e avaliação de sua exatidão" Projeto Final de Engenharia Cartográfica. Faculdade de Engenharia – Universidade do Estado do Rio de Janeiro-UERJ, Setembro, 2006

TOUTIN, T. & GRAY, L. "State-of-the-art of elevation extraction from satellite SAR data" In: ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 55 _2000. 13–33

TRICART, J "Normes pour l' établissement de la carte géomorphologique détaillée de la France (1/20.000, 1/25.000, 1/50.000) CNRS. Mém et Docum., nouvelle série, 1972, vol. 12: 37-105"

TRIMBLE. "eCognition Developer Version 8 – User Guide". Software. 2011

VALERIANO, M. de M.. "Dados Topográficos" in: FLORENZANO, T. G. (org.). "Geomorfologia Conceitos E Tecnologias Atuais". Oficina de Textos. São Paulo, 2008

VALERIANO, M. de M.. "Modelo Digital de Elevação com Dados SRTM disponíveis para a América do Sul". 2004. 72f. Dissertação de Mestrado - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, São José dos Campos, 2004

VALERIANO, M. de M. "Modelo Digital De Variáveis Morfométricas Com Dados SRTM Para O Território Nacional: O Projeto TOPODATA" in: Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR. Goiânia, GO. 16 a 21 de abril. 2005. p. 3595-3602

VALERIANO, M. M. de & ROSSETTI, D. de F. "TOPODATA: Seleção de Coeficientes Geoestatísticos para refinamento unificado de dados SRTM" Relatório de Produtividade em Pesquisa "Desenvolvimento de aplicações de dados topográficos SRTM – INPE, São José dos Campos, 2010.

VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F.; ALBUQUERQUE, P. C. G. Topodata: desenvolvimento da primeira versão do banco de dados geomorfométricos locais em cobertura nacional. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2009, Natal, RN. Anais..., São José dos Campos, SP : INPE, 2009. v. CD-ROM. p. 1-8.

VENTURI, L. A. B. A ausência de números na Geografia aproximando-a das Ciências Formais. In: Ensaios Geográficos. São Paulo: Humanitas, 2008.

VERSTAPPEN, H. T., Van ZUIDAM, R.A. (1975) ITC system of geomorphologic survey: ITC textbook of photo – interpretation. Use of Aerial Photographs in Geomorphology by: Institute for Aerial Survey and Earth Sciences (ITC). Enschede. v.7, ed.3, 52p.

WOLF, M.; PFENNING, B.; KRAUSE, P.; FLÜGEL, A..“Delineation of topographic process entities using SRTM for Hydrological modelling”. In: 18th World IMACS/MODSIM Congress, Cairns, Australia 13-17 July, 2009. p.2021-2027

ZUIDAM, R. A. van “Considerations on systematic médium-scale geomorphological mapping” Enschede Z.Geomorph N.F. n26, 1982 p.473-480

APÊNDICES

APÊNDICE A – Árvore de Processos (Process Tree)

Árvore de Processos

APÊNDICE B – Funções de Pertinência (Membership Function)

Reservatório

The image shows two dialog boxes for the 'Reservatório' class. The 'Class Description' dialog on the left has the name 'Reservatórios', a color selection, and a list of modifiers. The 'Membership Function' dialog on the right is for the feature 'Mean NIR'. It shows a graph with a blue curve representing the membership function. The x-axis is labeled 'Coordinates' with values 0 and 9070. The y-axis is labeled 'x/y' with values 0 and 1. The 'Entire range of values' is [0...65535] and the 'Display unit' is 'No Unit'.

Cinturão Orogenico do Atlântico

The image shows three dialog boxes for the 'Cinturão Orogenico do Atlântico' class. The 'Class Description' dialog on the left has the name 'Cinturão Orogenico do Atlântico', a color selection, and a list of modifiers. The two 'Membership Function' dialogs on the right are for the features 'Mean DEM' and 'Standard deviation Slope'. Both show graphs with blue curves representing the membership functions. The x-axis is labeled 'Coordinates' and the y-axis is labeled 'x/y'. The 'Entire range of values' and 'Display unit' are also shown for each feature.

Bacia Sedimentar do Paraná

ANEXOS

COMPARTIMENTAÇÃO DE MORFOESTRUTURAS POR GEOBIA

Universidade de São Paulo
Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas
Departamento de Geografia
Programa de Pós-Graduação em Geografia Física
Análise Orientada à Objetos Geobrâficos (GEOBIA) no Mapeamento da Transição entre Cinturão Orogênico do Atlântico e Bacia Sedimentar do Paraná

Datum WGS84
Projeção Universal Transversa de Mercator

Org: KAWATA, L. T. (2014)