

ANÁLISE ORIENTADA A OBJETO E DADOS ASTER/TERRA NA CLASSIFICAÇÃO DO RELEVO

Object-Based Analysis and ASTER/Terra Data for Classifying Relief Units

FLÁVIO FORTES CAMARGO¹
TERESA GALLOTTI FLORENZANO¹
CLÁUDIA MARIA DE ALMEIDA¹
CLEBER GONZALES DE OLIVEIRA¹
RAUL QUEIROZ FEITOSA²

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE
Divisão de Sensoriamento Remoto – DSR
{fortes, teresa, almeida, cleber}@dsr.inpe.br

²Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-RIO
Departamento de Engenharia Elétrica
raul@ele.puc-rio.br

RESUMO

O objetivo desta pesquisa foi desenvolver uma metodologia semi-automatizada de mapeamento de unidades de relevo, que utiliza análise orientada a objeto (AOO). A área de estudo é o município de São José dos Campos (SP). Com esse intuito, utilizou-se uma rede semântica hierárquica multinível para representação do conhecimento do especialista/geomorfólogo, além de lógica nebulosa e um conjunto de variáveis multiespectrais, geomorfométricas e texturais. As variáveis geomorfométricas e texturais foram derivadas de MDE obtido de imagens estereoscópicas do sensor ASTER/Terra. A acurácia altimétrica desse MDE foi avaliada. A validação do mapa de unidades de relevo foi realizada, considerando os objetos (ou segmentos) por meio de estatísticas derivadas de uma matriz de erros, obtida da comparação com um mapa de referência gerado a partir da interpretação visual das imagens estereoscópicas. Com base nos resultados obtidos, concluiu-se que AOO é uma metodologia viável para a semi-automação de procedimentos relacionados ao mapeamento de unidades de relevo.

Palavras chave: Geomorfologia; Sensoriamento Remoto; Processamento digital de imagens; Segmentação multiresolução; Redes semânticas; Lógica nebulosa.

ABSTRACT

The aim of this research is to develop an object-based methodology for semi-automatic mapping of relief units. The study area is the municipality of São José dos Campos, located in São Paulo State, Brazil. For this end, a multilevel hierarchical semantic network (meant for the storage and reproduction of expert knowledge) together with fuzzy logic and a set of multispectral, geomorphometric and textural variables were used. The geomorphometric and textural variables were extracted from a DEM, obtained from a stereo pair of ASTER/Terra images. The DEM altimetric accuracy was evaluated. The validation of the final relief units map was accomplished by means of object-based statistical indices derived from an error matrix, obtained by means of a comparison between the classified scene and a reference map. This reference map was produced from a visual interpretation of the stereoscopic images. Based on the obtained results, the object-based approach has shown to be a suitable method for relief units mapping.

Keywords: Geomorphology; Remote Sensing; Digital images processing; Multiresolution segmentation; Semantic nets; Fuzzy logic.

1 INTRODUÇÃO

Mapas geomorfológicos representam uma fonte de dados imprescindível em estudos e atividades de intervenção no meio físico. Esses mapas fornecem informações relevantes às pesquisas geomorfológicas e também são úteis em atividades aplicadas, tais como inventários de recursos naturais, prevenção de desastres e planejamento urbano e rural.

O Sensoriamento Remoto é uma das principais fontes de dados para as atividades de mapeamento geomorfológico. As fotografias aéreas têm sido amplamente utilizadas em procedimentos monoscópicos e estereoscópicos de interpretação visual (ZUIDAM, 1986). Atualmente, uma gama de novos sensores, aerotransportados e orbitais, adquire dados nas faixas espectrais do visível e de microondas. Aliado a isso, métodos fotogramétricos, radargramétricos, interferométricos e de varreduras a laser possibilitam a extração de Modelos Digitais de Elevação (MDEs).

Sensores ópticos orbitais, tais como o HRS/SPOT, o ASTER/Terra (TOUTIN, 2001) e o PRISM/ALOS (IGARASHI, 2001), fornecem imagens estereoscópicas com geometrias de visada adequadas à extração de MDEs, utilizando métodos fotogramétricos. Além disso, a radargrametria (PARADELLA et. al., 2005) e a interferometria (RODRIGUEZ et. al., 2005) também têm sido úteis no mapeamento topográfico, pois sensores de microondas são menos suscetíveis à cobertura de nuvens.

Paralelamente ao avanço tecnológico dos sensores, o desenvolvimento das ciências da computação tem propiciado a concepção de sistemas sofisticados para análise de dados geográficos e automação de tarefas de mapeamento. A automação

é realizada por meio de Sistemas Computacionais Convencionais (SCs) ou Sistemas Computacionais Especialistas (SEs). Os SCs realizam processamento algorítmico e são guiados pelas variáveis estatísticas dos dados, enquanto os SEs empregam estratégias de modelagem baseada no conhecimento temático ou específico introduzido pelo intérprete humano (MOORE, 2000; MOORE et al., 2003).

Redes semânticas têm sido empregadas na realização dessas estratégias (MOORE, 2000; ANTUNES et al., 2003). Essas redes são grafos que formalizam e representam o conhecimento humano por meio de um conjunto de nós conectados por arcos. De modo geral, os nós representam conceitos, e os arcos, as relações entre eles (BITTENCOURT, 2006). O conceito, unidade básica dessa metodologia, combina estrutura (atributos) e comportamento (operações) dos dados em uma única entidade. As suas principais características são: (i) identidade, (ii) classificação, (iii) polimorfismo e (iv) herança (RUMBAUGH et al., 1994). Os SEs também utilizam lógica nebulosa para tratar incertezas e emular o raciocínio humano (MOORE, 2000).

Atualmente, há o SE comercial Definien[®], que realiza tarefas de interpretação de imagens de Sensoriamento Remoto. Esse SE emprega segmentação multiresolução (na obtenção dos objetos da análise), redes semânticas hierárquicas (armazenamento e modelagem do conhecimento) e lógica nebulosa (tratamento de incertezas) (BENZ et. al., 2004). Há exemplos da aplicação dessa plataforma em atividades semi-automatizadas de mapeamento geomorfológico (ASSELEN; SEIJMONSBERGEN, 2006; CAMARGO, 2008).

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é apresentar uma metodologia semi-automatizada de mapeamento de unidades de relevo a partir de uma abordagem que se baseia em conhecimento especialista e variáveis derivadas de MDE ASTER/Terra.

2 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo, com 1.098,6 km², é o município de São José dos Campos (SP), localizado no médio vale do rio Paraíba do Sul (Figura 1). Esse município foi selecionado para análise em face da sua diversidade morfológica, existência de estudos anteriores e facilidade de acesso.

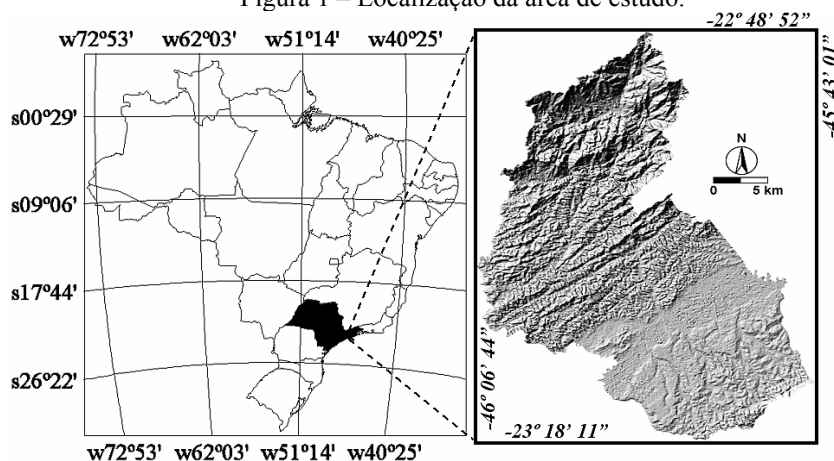
O médio vale do rio Paraíba do Sul está inserido em um sistema de montanhas constituído das Serras do Mar e da Mantiqueira. Esse sistema é a mais destacada feição orográfica da borda atlântica do continente sul-americano, e sua história evolutiva data do Pré-Cambriano (ALMEIDA; CARNEIRO, 1998). Destacam-se, em ordem cronológica, três grandes conjuntos de eventos responsáveis pela sua configuração fisiográfica: (i) sucessivas interações entre placas continentais (no Proterozóico) que formaram faixas móveis acrescionárias, colisionais e transpressionais (ALMEIDA; CARNEIRO, 1998); (ii) geração da superfície de aplainamento Japi (entre o Cretáceo Superior e o Terciário Inferior) por meio da erosão de corpos rochosos (ígneos e metamórficos, principalmente) (ALMEIDA,

2000); e (iii) tectogênese (início no Paleógeno), sedimentação e preenchimento de hemi-grábens (ALMEIDA, 2000).

Esses processos definiram as características litológicas e geomorfológicas da área de estudo. Com relação à litologia, esta é composta de rochas cristalinas (ígneas e metamórficas) dos complexos: (i) Amparo, (ii) Embu, (iii) Paraíba do Sul e (iv) Paraísopolis. Ocorrem também rochas sedimentares da formação Taubaté (Terciário Superior) e depósitos quaternários (aluviões). Nos complexos citados, predominam gnaisses (datando do Arqueano ao Proterozóico Médio) e suítes graníticas sin e pós-tectônicas (Proterozóico Superior), ambos ocasionados pelas movimentações crustais da orogênese Brasileira (Pré-Cambriano) (DNPM, 1983).

Nas rochas cristalinas, a geomorfologia da área de estudo é caracterizada por morrotes, morros, serras e montanhas, cujos valores de amplitude altimétrica, dissecação do relevo e declividade aumentam progressivamente a partir da primeira classe. Em terrenos sedimentares, ocorrem planícies aluviais, terraços e colinas terciárias (FLORENZANO; CSORDAS, 1993).

Figura 1 – Localização da área de estudo.



3 MATERIAL E MÉTODO

3.1 Material

No desenvolvimento desta pesquisa, foi utilizado o seguinte material: (i) imagens ASTER/Terra do subsistema *Visible Near-InfraRed* (VNIR) (bandas 3N e 3B; entre 0,78 e 0,86 μm); (ii) arquivo vetorial de eixo de logradouros; (iii) arquivo vetorial da rede hidrográfica; (iv) arquivos vetoriais de curvas de nível; (v) arquivos de pontos cotados, (vi) arquivos vetoriais com a delimitação das unidades geotécnicas; (vii) arquivos com coordenadas (E, N e H) de 109 pontos obtidos a

partir de levantamento de campo realizado com equipamentos GPS (*Global Positioning System*) geodésicos de uma frequência; e (viii) equipamentos Zscreen 2000® para visualização estereoscópica.

As imagens ASTER/Terra (item i), de 31/08/2004, foram adquiridas no nível de processamento L1B. Os produtos deste nível de processamento consistem em imagens com os coeficientes radiométricos e geométricos aplicados e co-registradas com as demais bandas do sistema sensor ASTER/Terra. Os coeficientes radiométricos representam os ganhos e *offsets* que devem ser aplicados para a calibração dos 5000 detectores CCD (*charge-coupled device*). Por sua vez, os coeficientes geométricos projetam a imagem para o sistema UTM e as orientam no sentido da órbita da plataforma. Cabe destacar que as imagens utilizadas neste trabalho apresentam uma distância de amostragem no terreno de 15 m e uma razão base/altura da plataforma de 0,6 (ABRAMS et al., 1999).

Os arquivos vetoriais (itens ii a vi), na escala 1:10.000, compõem o banco de dados geográficos “Cidade Viva”, disponível gratuitamente na Prefeitura Municipal de São José dos Campos (SP) (PMSJC). As coordenadas GPS (item vii) foram obtidas junto aos seguintes órgãos: Instituto de Estudos Avançados da Aeronáutica (IEAv), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e Fundação de Ciência, Aplicações e Tecnologia Espaciais (FUNCATE). Esses órgãos realizaram a conversão das altitudes geométricas em altitudes ortométricas. Os equipamentos ZScreen 2000® foram cedidos pelo INPE.

Camargo et al. (2007) avaliaram a acurácia planimétrica da base de eixo de logradouros e a acurácia altimétrica do MDE, utilizado nesta pesquisa, obtido dos arquivos vetoriais de curvas de nível e pontos cotados. De acordo com esses autores, a base de eixo de logradouros atende ao Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) classe A, escala 1:10.000, e o MDE, ao PEC classe A, escala 1:50.000. Com relação aos aplicativos, foram empregados os pacotes de processamento de imagens PCI Geomatica 10.0.3 e ENVI 4.3; o SIG SPRING 4.3.3 e a plataforma orientada a objeto de interpretação de imagens Definiens Professional 5.0.

3.2 Método

3.2.1 Orientação do par estereoscópico e extração automática do MDE

Apesar da disponibilidade dos dados altimétricos fornecidos pela PMSJC (mencionados na Seção 3.1), optou-se pela extração de um MDE a partir das imagens estereoscópicas do sensor ASTER/Terra com o intuito de minimizar as diferenças entre as qualidades geométricas dos dados de referência e da segmentação. Isso é possível devido ao emprego do mesmo par estereoscópico na interpretação visual 3D (geração do mapa de referência) e na extração automática do MDE.

Para a extração do MDE, foi utilizado o aplicativo PCI Geomatica 10.0.3 (módulo OrthoEngine), com o qual os seguintes procedimentos foram realizados: 1)

coleta de pontos de controle e pontos de enlace; 2) estimação dos parâmetros do modelo matemático e orientação do par estereoscópico; 3) geração de imagens com geometria epipolar; 4) cálculo das paralaxes por estéreo-correlação; e 5) geração da grade altimétrica (MDE). Nos procedimentos 1 e 2, utilizaram-se os dados de efemérides e atitude do sistema sensor ASTER/Terra (disponíveis nos metadados das imagens), o modelo matemático Toutin, 43 pontos de controle 3D no terreno (*Ground Control Points – GCPs*) e 90 pontos de enlace 2D (*Tie Points – TP*s). O modelo utilizado se baseia nas condições e equações de colinearidade (para imagens individuais) e coplanaridade (para imagens estereoscópicas), e, portanto, baseia-se no modelo fotogramétrico rigoroso (TOUTIN, 2004a; 2006). Sabendo-se que os parâmetros necessários para os diferentes tipos de correções (sensor/plataforma; rotação da terra e projeção cartográfica) são correlacionados, o modelo Toutin reduz esses parâmetros a um conjunto descorrelacionado, a partir dos quais realiza, simultaneamente, todas as correções (TOUTIN, 2004a). A acurácia posicional do modelo pode ser melhorada com o uso de GCPs, empregados em um procedimento iterativo de refinamento pelo método dos mínimos quadrados (TOUTIN, 2002; 2004a; 2004b; 2006).

Os GCPs foram obtidos na base de eixo de logradouros (coordenadas E e N) e no MDE (coordenada H), gerado com os arquivos de curvas de nível e pontos cotados. Com relação aos TPs, Toutin (2002; 2004a; 2004b; 2006) os define como pontos homólogos, coletados simultaneamente entre as imagens do par estereoscópico, os quais fornecem maior rigidez ao modelo. Na Tabela 1, há um resumo das características do modelo ajustado. A Figura 2, por sua vez, destaca a sobreposição entre as imagens do par estereoscópico e a distribuição dos GCPs e TPs.

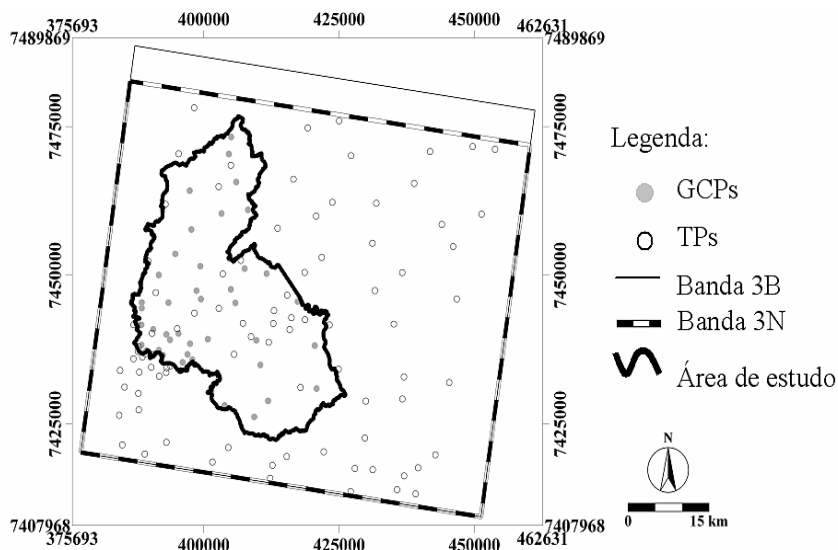
Na Figura 2, observa-se que os GCPs estão concentrados na porção oeste do par estereoscópico, devido ao fato de que a base de eixo de logradouros não cobre toda a área das imagens ASTER/Terra. A despeito disso, os GCPs cobrem toda a variação altimétrica da cena (desde planícies baixas a serras muito altas). No entanto, a ausência de GCPs nas bordas das imagens possivelmente ocasionou alguma extrapolação em planimetria (TOUTIN, 2004a), a qual não comprometeu as etapas metodológicas subseqüentes deste trabalho.

Após a orientação do par estereoscópico e extração das imagens epipolares, efetuou-se o cálculo automático das paralaxes. Este foi realizado a partir de janelas de busca e correlação que localizam *pixels* homólogos entre as imagens (EHLERS; WELCH, 1987). A medida de correlação empregada foi o coeficiente normalizado de correlação cruzada. Detalhes sobre o seu cálculo podem ser encontrados em Russ (1998).

Tabela 1 – Resumo das características do modelo ajustado.

	Nº de GCPs	Nº de TP	Erro Médio Quadrático (EMQ) dos GCPs (m)
MDE ASTER/Terra	43	90	2,68

Figura 2 – Cobertura das imagens do par estereoscópico e distribuição dos GCPs e TP.



3.2.2 Validação do MDE e extração das imagens empregadas na classificação

Para a validação do MDE, foram utilizados os 109 pontos GPS mencionados na Seção 3.1. Esses pontos e o MDE ASTER/Terra foram referenciados ao mesmo *datum* horizontal (SAD69/Brasil) e ambos estão no mesmo sistema de projeção (UTM). Desse modo, foram obtidas as discrepâncias entre o MDE ASTER/Terra e as altitudes dos pontos GPS (altimetria MDE – altimetria GPS). Posteriormente, realizou-se uma análise estatística descritiva dos resíduos e também foi aplicado um teste t de *Student* para avaliar se a média desses não apresenta tendência. Os resultados obtidos foram confrontados com outros trabalhos científicos, que também avaliaram a acurácia altimétrica dos dados ASTER/Terra e serviram de indicativo da qualidade do MDE empregado na classificação. A Figura 3 apresenta a distribuição dos pontos GPS na área de estudo.

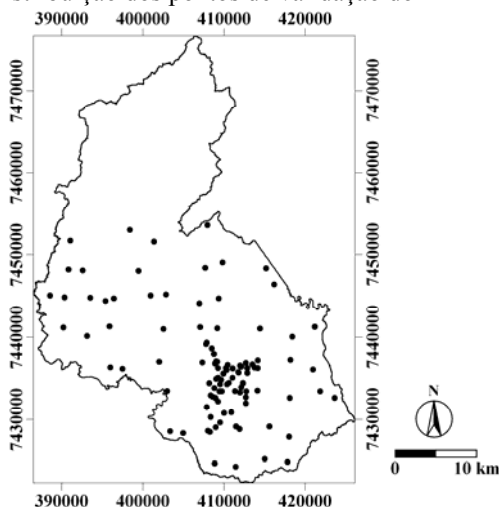
Após a validação, extraíram-se as imagens empregadas no modelo cognitivo de classificação. A imagem da banda 3N também foi utilizada, após a sua

ortorretificação a partir do MDE ASTER/Terra obtido. A imagem temática da rede de drenagem foi fornecida pela PMSJC, e as demais imagens foram derivadas do MDE ASTER/Terra. O Quadro 1 apresenta as imagens empregadas no modelo cognitivo.

A declividade é uma das componentes do vetor obtido da primeira derivação do MDE e caracteriza a inclinação da vertente. A segunda derivação fornece as curvaturas horizontal e vertical (VALERIANO, 2003; VALERIANO; CARVALHO Jr., 2003). A curvatura vertical evidencia áreas de aceleração e desaceleração gravitacional a partir da caracterização das vertentes em tipos côncavo (valores negativos), convexo (valores positivos) ou retilíneo (valores nulos) (SHARY, 2008). A curvatura horizontal destaca as linhas de convergência (valores negativos) e divergência (valores positivos) do escoamento superficial (SHARY, 2008).

Para a mensuração das imagens de textura, empregou-se o método que se baseia na matriz de co-ocorrência dos níveis de cinza (*grey level co-occurrence matrix* – GLCM). O método GLCM consiste em um histograma bi-dimensional de níveis de cinza de pares de *pixels* que estão em uma relação espacial definida pelo comprimento δ e pela orientação θ do segmento de reta que os une (PCI, 2006). Para maior detalhamento do método, consultar Clausi (2002) e PCI (2006). A grade de fluxo acumulado é um dos subprodutos do processo de extração automática de redes de drenagens e seu valor, em um ponto y qualquer, consiste na quantidade de *pixels* (a montante de y) que contribuem para o escoamento superficial nesse ponto (PCI, 2006).

Figura 3 – Distribuição dos pontos de validação do MDE ASTER/Terra.



Quadro 1 – Resumo das imagens empregadas no modelo cognitivo.

Tipo de imagem	Descrição
Multiespectral	Banda ASTER 3N (0,78 – 0,86 μm) ortorretificada
Geomorfométrica	Altimetria (MDE ASTER/Terra)
	Declividade
	Curvatura vertical
	Curvatura horizontal
Textural	Segundo momento angular
	Entropia
	Desvio padrão
Outras	Imagem temática da rede de drenagem
	Grade de fluxo acumulado
	Relevo sombreado

3.2.3 Mapa de referência

A legenda do mapa de referência gerado segue a proposta do sistema ITC (*International Institute for Aerial Survey and Earth Sciences*) (VERSTAPPEN; ZUIDAM, 1991) e destaca os aspectos morfogenéticos, por meio de denominações específicas e cores. As classes da legenda são as seguintes: (i) Serras/Montanhas/Morros (roxo), (ii) Colinas Sedimentares (marrom), (iii) Planícies Fluviais (verde escuro) e (iv) Alvéolos/Planícies Fluviais Intermontanas (verde claro). A nomenclatura foi adaptada de IPT (1981), as características litológicas foram consultadas na carta geotécnica da PMSJC, e a restituição do mapa foi realizada a partir do par de imagens epipolares, na estação digital 3D.

3.2.4 Segmentação

Foram gerados três níveis de segmentação: no nível 1, delimitaram-se os reservatórios ou corpos d'água; no nível 2, as unidades de relevo, e, no nível 3, a densidade de drenagem. Esta foi obtida a partir da razão entre a área da rede hidrográfica e a área de cada objeto no nível 3, tendo sido posteriormente empregada como um atributo para a classificação do nível 2. Os objetos são pequenos no nível 1 e aumentam progressivamente até o nível 3.

Devido à dependência entre os limites dos objetos (pertencentes a diferentes níveis), as segmentações dos níveis 1 e 3 foram realizadas separadamente, em projetos distintos. Isso foi necessário porque, para o cálculo da densidade de drenagem, os canais foram segmentados em um fator de escala muito pequeno. O mesmo ocorreu na segmentação dos reservatórios. Dessa forma, os resultados foram incorporados à rede com três níveis, de modo que não comprometeram a segmentação das unidades de relevo (nível 2).

Na Tabela 2, são apresentadas as imagens e os valores dos parâmetros

empregados na segmentação. A homogeneidade dos objetos da segmentação é definida pelos parâmetros de cor e forma, sendo que o parâmetro cor determina a homogeneidade espectral dos objetos (tons de cinza), e o parâmetro forma, a homogeneidade textural destes. O parâmetro forma é subdividido nos seguintes parâmetros: suavidade e compacidade. A suavidade otimiza a geração de objetos com bordas suaves. Por outro lado, a compacidade permite a geração de objetos compactos e com bordas regulares. Por fim, o tamanho dos objetos da segmentação é determinado pelo valor do fator de escala, o qual define o desvio padrão máximo da composição de homogeneidade (definida pelos parâmetros anteriormente mencionados) (DEFINIENS, 2006). Um maior detalhamento sobre os cálculos envolvidos pode ser obtido em Benz et. al. (2004).

Com base nesses parâmetros, os níveis de segmentação foram obtidos de modo heurístico, ou seja, por tentativa e erro. No nível 1 (Reservatórios), o parâmetro cor foi fundamental para a delimitação dos corpos d'água, devido à grande distinção espectral entre este tipo de cobertura da terra e os demais existentes na imagem utilizada. Desse modo, foi estabelecido um peso elevado para esse parâmetro (0,8) em detrimento da forma, para a qual foram mantidos pesos iguais de suavidade e compacidade (0,5 para cada parâmetro). No entanto, o fator de escala máximo foi fixado em 30 para preservar as bordas e reentrâncias dos corpos d'água. No caso do nível 2 (Unidades de Relevo), novamente foi atribuída maior importância (0,7) à cor (variação dos tons de cinza do MDE), pois verificou-se que a variação de tonalidade destaca alguns compartimentos altimétricos da área de estudo que coincidem com os limites das unidades de relevo. A melhor delimitação foi obtida com um peso de 0,7 para o parâmetro suavidade e com um fator de escala de 50.

No nível 3 (Densidade de Drenagem), o objetivo foi a geração de objetos regulares, aproximadamente semelhantes em área e que preservassem os limites entre as unidades de relevo. Como a densidade de drenagem é obtida da razão entre a área dos canais fluviais e a área dos objetos do nível 3, a regularidade em área dos objetos do nível 3 foi primordial para a obtenção de valores coerentes de densidade de drenagem. Regiões com poucos canais fluviais e com predominância de objetos muito pequenos poderiam dar a falsa impressão de terem uma densidade de drenagem igual ou superior àquelas de áreas montanhosas dissecadas e com a presença de inúmeros canais de drenagem. Desse modo, observou-se que a imagem de relevo sombreado (com elevação e azimuth solares de, respectivamente, 45° e 315°) combinada a um fator de escala grande (200) e a um peso maior para o parâmetro forma, foi adequada para a geração dos objetos de interesse para o cálculo da densidade de drenagem. A configuração de iluminação empregada na imagem de relevo sombreado destacou falhas, lineamentos e a maioria dos limites entre as principais feições geomórficas da área de estudo. Aliado a isso, o fator de escala permitiu objetos grandes e o parâmetro de forma tornou estes mais regulares em tamanho.

Cabe salientar que pequenas edições manuais foram realizadas para a correção

de erros na delimitação das unidades de relevo e nas classificações dos níveis 1 e 3.

Tabela 2 – Imagens e parâmetros (e = fator de escala; c = cor; f = forma; comp. = compacidade e suav. = suavidade) utilizados na segmentação das unidades de relevo.

Nível	Imagem segmentada	e	c	f	comp	suav
1. Reservatórios	Banda 3N (número digital)	30	0,8	0,2	0,5	0,5
2. Unidades de Relevo	Altimetria (MDE)	50	0,7	0,3	0,3	0,7
3. Densidade de Drenagem	Relevo sombreado	200	0,1	0,9	0,5	0,5

3.2.5 Seleção de atributos, definição da rede semântica hierárquica e classificação

Na análise exploratória, empregaram-se histogramas com valores amostrais dos atributos calculados a partir dos objetos da segmentação. A Tabela 3 apresenta os atributos das unidades de relevo. Verifica-se a sobreposição de valores/intervalos, em algumas classes. Essa confusão foi minimizada através: (i) da utilização do operador nebuloso *AND* e suas funções flexíveis (gaussianas, trapezoidais, exponenciais etc.) (para maior detalhamento sobre funções nebulosas, consultar McBRATNEY; ODEH, 1997); e (ii) a partir do conceito de herança oriundo da AOO.

O operador nebuloso *AND*, tal como o operador booleano *AND*, tem por característica retornar valores comuns entre dois conjuntos (retorna o mínimo). Desse modo, este operador possibilita a combinação de atributos considerados únicos a uma dada classe. Como exemplo disto, destacam-se as classes “Serras/Montanhas/Morros” e “Colinas Sedimentares”, as quais têm valores comuns do atributo média da altimetria, no intervalo entre 572 e 688m, e valores comuns de média da declividade, no intervalo entre 4,9° e 12° (ver Tabela 3). Neste caso, a inserção do atributo média da entropia entre 1,2 e 2,2 (existente somente nas áreas de colinas) restringe ainda mais os resultados do operador nebuloso *AND* e reduz drasticamente a confusão entre as classes mencionadas. Com relação ao conceito de herança, este foi explorado a partir da criação de subclasses (Tabela 4 e Figura 4) que herdaram os atributos das classes da legenda e acrescentaram novos atributos para a identificação dos erros de comissão. Esta estrutura hierárquica evitou a confusão entre as subclasses criadas e as classes já existentes e permitiu o incremento dos acertos da classificação. Este incremento foi possível a partir da agregação das classes por significado semântico, ou seja, as subclasses de erros são reinseridas no domínio de suas classes verdadeiras por meio do recurso de agrupamento por similaridade de legenda (*Groups*), disponível na plataforma

Definiens[®]. Por exemplo, os objetos das subclasses de erros de comissão relativas à classe “Serras/Montanhas/Morros” e inseridas nas classes “Planícies Fluviais” e “Colinas Sedimentares” (Tabela 4) são considerados objetos da classe “Serras/Montanhas/Morros”.

Nas Tabelas 5 e 6, são apresentados, respectivamente, os atributos empregados nas classificações dos corpos d’água e da densidade de drenagem. Esses atributos também foram selecionados a partir da análise de histogramas, procedimento mencionado no início desta Seção (3.2.5). Na Tabela 7, encontram-se os atributos das subclasses de erros de comissão, utilizadas no refinamento da densidade de drenagem. Esse refinamento foi realizado também a partir da agregação das subclasses de erros de comissão às respectivas classes com mesmo significado semântico. Após a análise exploratória de atributos, definiu-se a rede semântica hierárquica (Figura 4), que modela o conhecimento especialista e foi empregada na classificação das unidades de relevo.

Tabela 3 – Atributos das unidades de relevo e reservatórios.

Unidades	Atributos
Serras/Montanhas/Morros	alta densidade de drenagem (nível 3); média da altimetria entre 572 e 2100m; média da declividade entre 4,9° e 34,9°.
Colinas Sedimentares	média da altimetria entre 560 e 688m; média da entropia entre 1,2 e 2,2; média da declividade entre 2,5° e 12°.
Planícies Fluviais	média da entropia entre -0,01 e - 1,5; média da declividade entre 1,4° e 10°.
Alvéolos/Planícies Fluviais Intermontanas	amplitude altimétrica entre 10 e 12m; média da altimetria entre 678 e 687m; média da declividade entre 2,88° e 4,75°.
Reservatórios	existência de corpos d’água no nível 1.

Tabela 4 – Atributos empregados no refinamento das unidades de relevo, a partir de subclasses de erros de comissão.

Unidades	Subclasses	Atributos
Colinas Sedimentares	Colinas Sedimentares (acertos)	borda relativa à classe Serras/Montanhas/Morros (0 a 1). *a pertinência é alta em 0 (zero) e diminui exponencialmente em direção a 1.
	Erros de Comissão: Serras/ Montanhas/ Morros	borda relativa à classe Serras/Montanhas/Morros (0 a 1). *a pertinência é baixa em 0 (zero) e aumenta exponencialmente em direção a 1.

Planícies Fluviais	Planícies Fluviais (acertos)	diferença média do fluxo acumulado entre a classe Colinas Sedimentares (-850 a 2050); borda relativa à classe Serras/Montanhas/Morros (0 a 0,5).
	Erros de Comissão: Serras/ Montanhas/ Morros	borda relativa à classe Serras/Montanhas/Morros (0,4 a 0,64).
	Erros de Comissão: Colinas Sedimentares	diferença média do fluxo acumulado entre a classe Colinas Sedimentares (-850 a 2050); variância da curvatura horizontal (16,35 a 17).

Tabela 5 – Atributos da classe Corpos d'água.

Classe	Atributos
Corpos d'água	média da altimetria entre 609 e 707m; média do número digital da banda 3N entre 14 e 46.

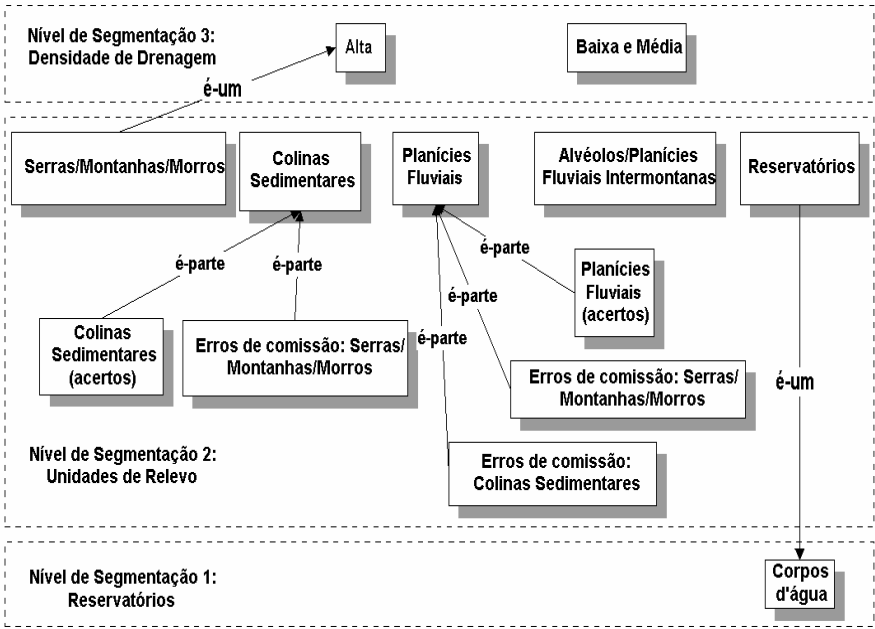
Tabela 6 – Atributos empregados na classificação da densidade de drenagem.

Nível de segmentação	Classes	Atributos
Hidrografia	Canais Fluviais	média do número digital da imagem temática da drenagem $\neq$ 255.
	Não-Canais	média do número digital da imagem temática da drenagem = 255.
Densidade de drenagem	Alta Densidade de Drenagem	área relativa dos canais, por objeto de densidade de drenagem (0,044 a 1).
	Baixa e Média Densidade de Drenagem	área relativa dos canais, por objeto de densidade de drenagem (10^{-4} a $4,35 \cdot 10^{-2}$).

Tabela 7 – Atributos empregados no refinamento da densidade de drenagem, a partir de subclasses de erros de comissão.

Classe	Subclasses	Atributos
Baixa e Média Densidades de Drenagem	Baixa e Média (acertos)	borda relativa à classe Alta Densidade de Drenagem (0,15 a 0,9)
	Erros de Comissão: Alta Densidade de Drenagem	borda relativa à classe Alta Densidade de Drenagem (0,15 a 0,9).

Figura 4 – Rede semântica hierárquica empregada na classificação das unidades de relevo.



3.2.6 Pós-processamento e validação

No pós-processamento, utilizou-se um conjunto de algoritmos disponível na plataforma de interpretação de imagens, empregada nesta pesquisa (DEFINIENS, 2006). Esses algoritmos têm interface gráfica para usuário e podem ser parametrizados. Desse modo, foram empregados dois tipos de algoritmos: (i) *find enclosed by class* e (ii) *find local extrema*. O primeiro (i) classifica (ou re-classifica)

os objetos de acordo com regras de vizinhança. O segundo (ii) também classifica (ou re-classifica) objetos de acordo com valores extremos de um dado atributo, verificados nas vizinhanças dos objetos. Por exemplo, classificar todos os objetos não-classificados contidos por objetos da classe “Colinas Sedimentares”, como “Colinas Sedimentares”. Assim, todos os objetos que satisfaçam essa regra são classificados. O segundo (ii) também classifica (ou re-classifica) objetos de acordo com valores extremos de um dado atributo, verificados nas vizinhanças dos objetos. Por exemplo, um objeto não classificado não está totalmente contido por objetos de uma dada classe e, desse modo, não pode ser classificado pelo primeiro algoritmo (i). Neste caso, podemos utilizar uma busca de todos os objetos não-classificados com valores extremos (máximo, por exemplo) de vizinhança com uma dada classe (“Colinas Sedimentares”, por exemplo). Os objetos que atenderem a essa regra serão classificados como “Colinas Sedimentares”. Para maiores detalhes sobre o funcionamento dos algoritmos, consultar Definiens (2006).

A validação foi efetuada por meio de uma matriz de erro, considerando os objetos da segmentação, na qual se compararam a classificação e o mapa de referência. Dessa matriz, extraíram-se as seguintes estatísticas: (i) acurácia global, (ii) do produtor, (iii) do usuário e (iv) índice Kappa.

4 RESULTADOS

4.1 Validação do MDE

Anteriormente à validação, por meio de uma avaliação qualitativa do MDE, detectaram-se áreas sem dados (problemas na extração das paralaxes). Essas áreas, que correspondem principalmente a corpos d’água, são mostradas por círculos, na Figura 5. Verificou-se também que as cenas e o MDE gerado não cobrem totalmente a área do município, conforme destaca o retângulo na Figura 5.

Os resultados das estatísticas descritivas (Tabela 8) estão de acordo com outros trabalhos que avaliaram a acurácia altimétrica dos dados ASTER/Terra (WELCH et al., 1998; TOUTIN, 2002; FUJISADA et al., 2005; TOUTIN, 2008; OLIVEIRA; PARADELLA, 2008), com destaque para o valor do Erro Médio Quadrático (EMQ) de 9,38 m. Observa-se, na Tabela 8, que a hipótese nula do teste t não foi atendida ($t_{amostral} < t_{(n-1, 5\%)}$) e que o MDE apresenta tendência positiva. Este resultado é coerente, pois o MDE ASTER/Terra é um Modelo Digital de Superfície (MDS) e sofre a interferência da altura dos diferentes tipos de cobertura do solo (cobertura florestal, edificações etc.).

Figura 5 – MDE, falta de dados (círculos tracejados) e limite de cobertura da cena (retângulo).

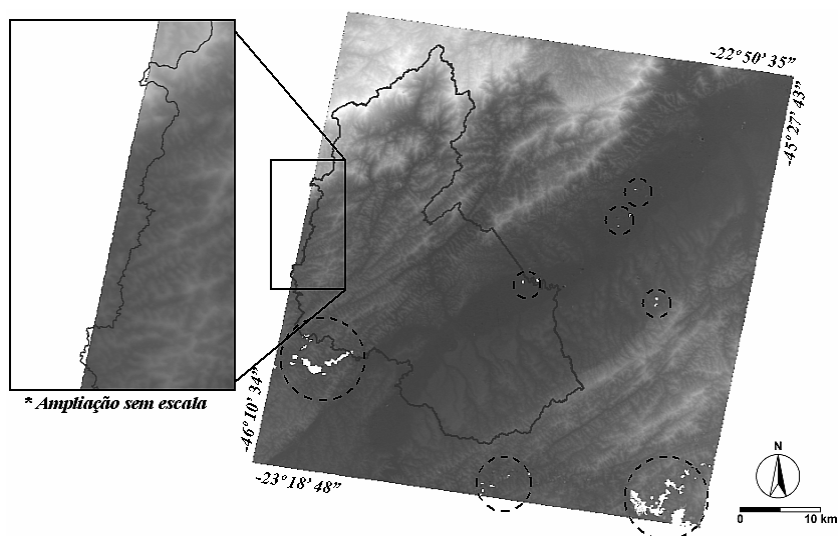


Tabela 8 – Resumo das estatísticas de validação da altimetria do MDE
ASTER/Terra.

MDE ASTER/Terra	
Nº de Pontos GPS	109
Erro Mínimo (m)	-18,40
Erro Máximo (m)	30,60
Média (m)	4,14
Desvio Padrão	8,40
EMQ (m)	9,38
$t_{amostral}$	5,146
$t_{(n-1, 5\%)}$	1,659

4.2 Classificação e pós-processamento

Observou-se a ocorrência de confusão entre as classes “Colinas Sedimentares” e “Planícies Fluviais”. Isso pode ser explicado principalmente pela similaridade entre os atributos das áreas de colinas tabuliformes (região sul do município) e os da classe “Planícies Fluviais”. A maneira encontrada para minimizar a confusão foi o emprego de subclasses que separam os acertos e os erros de comissão e,

posteriormente a isto, o uso do recurso de agrupamento por significado semântico, descrito na Seção 3.2.5. O refinamento da classificação foi efetuado por meio dos algoritmos *find enclosed by class* e *find local extrema*, mencionados na Seção 3.2.6.

Nas Figuras 6 e 7 são apresentados, respectivamente, o mapa obtido da interpretação visual, utilizado como referência, e o resultado da classificação semi-automática das unidades de relevo. As ampliações, na Figura 7, destacam alguns erros que permaneceram entre as classes “Serras/Montanhas/Morros” e “Colinas Sedimentares” (retângulo superior), e entre as classes “Planícies Fluviais” e “Colinas Sedimentares” (retângulo inferior).

4.3 Validação

Na Tabela 9, é apresentada a matriz de erros da classificação das unidades de relevo e os resultados da acurácia global e do índice Kappa. Na Tabela 10, são destacadas as acurácias do produtor e do usuário. Pela análise dos erros de comissão (linhas) e omissão (colunas) apresentados na Tabela 9, verifica-se que a classe “Colinas Sedimentares” apresentou confusão tanto com a classe “Serras/Montanhas/Morros” quanto com a classe “Planícies Fluviais”. Isso se explica pela diversidade de padrões de colinas, variando de superfícies relativamente planas a terrenos moderadamente dissecados. Por outro lado, a confusão entre “Serras/Montanhas/Morros” e “Planícies Fluviais” foi reduzida e se restringiu a áreas de contato entre as duas unidades.

Figura 6 – Mapa obtido da interpretação visual.

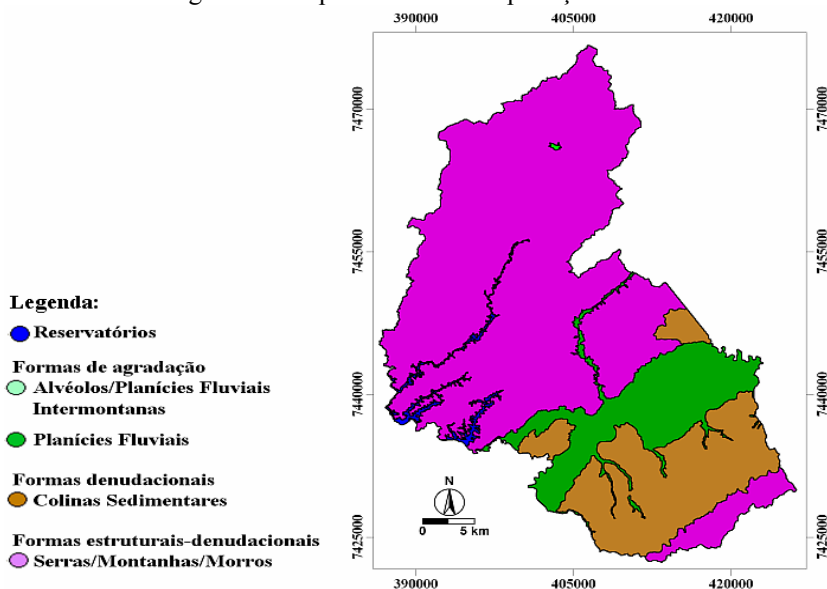
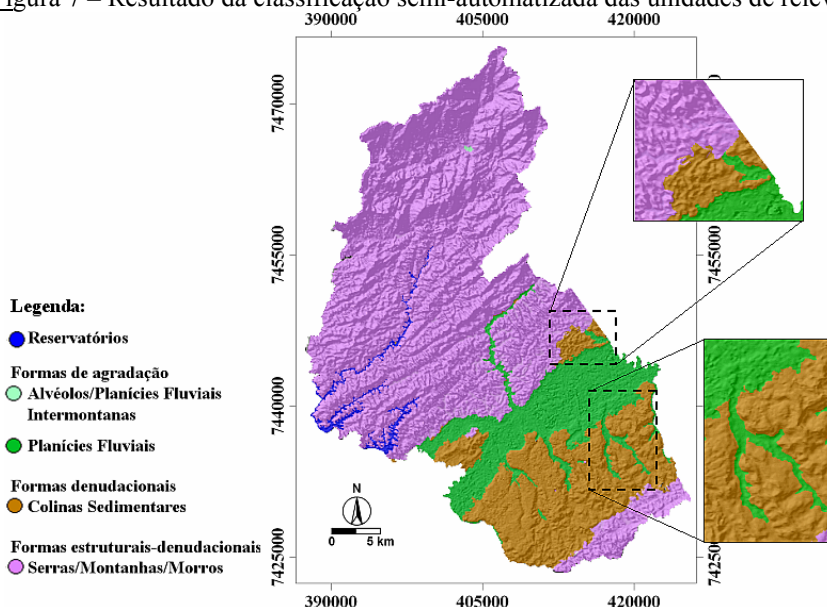


Figura 7 – Resultado da classificação semi-automatizada das unidades de relevo.



De acordo com Landis e Koch (1977), o índice Kappa é considerado de “forte concordância”. No que diz respeito às acurácias do produtor e do usuário, essas também apontam adequada concordância entre a classificação e o mapa de referência.

Tabela 9 – Matriz de erros e resultados da acurácia global e índice Kappa (Serras/Montanhas/Morros = 1; Colinas Sedimentares = 2; Planícies Fluviais = 3; Alvéolos/Planícies Fluviais Intermontanas = 4).

	Referência			
	1	2	3	4
1	4341	44	11	00
2	37	622	49	00
3	18	38	284	00
4	00	00	00	02

Acurácia Global: 0,9638

Índice Kappa: 0,8896

Tabela 10 – Acurácias do produtor e do usuário para cada unidade de relevo.

	Acurácia do produtor	Acurácia do usuário
Serras/Montanhas/Morros	0,987	0,987
Colinas Sedimentares	0,884	0,879
Planícies Fluviais	0,826	0,835
Alvéolos/Planícies Fluviais Intermontanas	1,000	1,000

5 CONCLUSÕES

O método utilizado nesta pesquisa demonstrou a viabilidade de uma classificação semi-automática de unidades de relevo. Esse procedimento não seria possível em plataformas convencionais de processamento digital de imagens, as quais operam apenas com informações estatísticas das regiões e com um único nível de segmentação.

Os resultados da rede semântica hierárquica sugerem que ela pode ser replicável para outras áreas de estudo com configurações morfológicas semelhantes, uma vez que o sistema permite o ajuste das funções e seus limiares, a fim de garantir a conformidade da rede à realidade em análise. Assim, o intérprete economiza esforço de modelagem e tempo de processamento computacional. Isso, no entanto, deve ser testado.

Objetos muito pequenos preservam as fronteiras, porém, são inadequados para seleção de atributos e, por conseguinte, inviabilizam a separação de classes. Por isso, uma relação de compromisso entre fronteiras das unidades e tamanho dos objetos da segmentação deve ser investigada.

Outro desafio é a diminuição do tempo na seleção de atributos e determinação de suas respectivas funções nebulosas. Nesse sentido, métodos que otimizem essas tarefas devem ser explorados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às instituições de fomento à pesquisa CAPES e CNPq; à FINEP/SEBRAE (Proc. 2799/06); aos dados GPS fornecidos por FUNCATE, INPE e IEAv, e também, ao Dr. Carlos Roberto de Souza Filho (IG-UNICAMP), pela cessão das imagens ASTER/Terra. Manifestamos, também, o nosso agradecimento aos revisores, cujas críticas contribuíram para a melhora do artigo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAMS, M.; HOOK, S.; RAMACHANDRAN, B. *ASTER user handbook (Version 2)*. [S.l.]: Jet Propulsion Laboratory – EROS Data Center, 1999. Disponível em:
<http://asterweb.jpl.nasa.gov/content/03_data/04_Documents/aster_user_guide_v2.pdf>. Acesso em: 01/Fev/2007.
- ALMEIDA, F. F. M. The origin and evolution of the South American Platform. *Earth-Science Reviews*, n. 70, p. 77 - 111, 2000.
- ALMEIDA, F. F. M.; CARNEIRO, C. D. Origem e evolução da Serra do Mar. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 28, n. 2, p. 135 - 150, 1998.
- ANTUNES, A. F. B.; LINGNAU, C.; CENTENO, J. A. S. Object-oriented analysis and semantic network for high resolution image classification. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 9, n. 2, p. 233 - 242, 2003.
- ASSELEN, S.; SEIJMONSBERGEN, A. C. Expert-driven semi-automated geomorphological mapping for a mountainous area using a laser DTM. *Geomorphology*, v. 78, n. 3-4, p. 309-320, 2006.
- BENZ, U. C.; HOFMANN, P.; WILLHAUCK, G.; LINGENFELDER, I.; HEYNEN, M. Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 58, n. 3-4, p. 239-258, 2004.
- BITTENCOURT, G. *Inteligência artificial: ferramentas e teorias*. Florianópolis/SC: Editora da UFSC, 2006. 371 p.
- CAMARGO, F. F. *Análise orientada a objeto aplicada ao mapeamento de unidades geomorfológicas a partir de dados ASTER/Terra*. 171 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos (SP). 2008. Disponível em:
<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2008/03.17.19.50>>. Acesso em: 25/Mai/2008.
- CAMARGO, F. F.; OLIVEIRA, C. G.; FLORENZANO, T. G.; ALMEIDA, C. M. Avaliação da acurácia posicional da base cartográfica do município de São José dos Campos (SP) por análises de tendência e precisão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA - I CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOPROCESSAMENTO, 23, Rio de Janeiro/RJ, Brasil. *Anais...* 2007. p. 775 - 780.
- CLAUSI, D. A. An analysis of co-occurrence texture statistics as a function of grey level quantization. *Canadian Journal of Remote Sensing*, v. 28, n. 1, p. 45-62, 2002.
- DEFINIENS. *Definiens professional 5*: reference book. Munich: Definiens (The Imaging Intelligence Company), 2006. 122 p.

- Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). *Folhas SF 23/24 (Rio de Janeiro/Vitória): geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra*. Rio de Janeiro/RJ: DNPM, 1983.
- EHLERS, M.; WELCH, R. Stereocorrelation of Landsat TM images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 53, n. 09, p. 1231 - 1237, 1987.
- FLORENZANO, T. G.; CSORDAS, S. M. *Mapa geomorfológico da Região do Vale do Paraíba e Litoral Norte do Estado de São Paulo*. São José dos Campos/SP: INPE, 1993.
- FUJISADA, H.; BAILEY, G. B.; KELLY, G. G.; HARA, S.; ABRAMS, M. J. ASTER DEM Performance. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 43, n. 12, 2707-2714, 2005.
- IGARASHI, T. ALOS mission requirement and sensor specifications. *Advances in Space Research*, v. 28, n. 1, p. 127-131, 2001.
- Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). *Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo*. São Paulo: IPT, escala 1:1000.000, 1981.
- LANDIS, J.; KOCH, G. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, v. 33, p. 159 - 174, 1977.
- McBRATNEY, A. B.; ODEH, I. O. A. Application of fuzzy sets in soil science: fuzzy logic, fuzzy measurements and fuzzy decisions. *Geoderma*, v. 77, n. 2-4, p. 85-113, 1997.
- MOORE, T. Geospatial expert systems. In: OPENSHAW, S.; ABRAHART, R. J. (Ed.). *Geocomputation*. London: Taylor & Francis, 2000.
- MOORE, A. B.; MORRIS, K. P.; BLACKWELL, G. K.; JONES, A. R.; SIMS, P. C. Using geomorphological rules to classify photogrammetrically-derived digital elevation models. *International Journal of Remote Sensing*, v. 24, n. 13, p. 2613-2626, 2003.
- OLIVEIRA, C. G.; PARADELLA, W. R. An assessment of the altimetric information derived from spaceborne SAR (RADARSAT-1, SRTM3) and optical (ASTER) data for cartographic application in the amazon region. *Sensors*, n. 8, p. 3819-3829, 2008.
- PARADELLA, W. R.; OLIVEIRA, C. G.; LUIZ, S.; CECARELLI, I. C. F. Operational use of RADARSAT-1 fine stereoscopy integrated with Landsat-5 thematic mapper data for cartographic application in the Brazilian Amazon. *Canadian Journal of Remote Sensing*, v. 31, n. 2, p. 139 - 148, 2005.
- PCI. *Geomática OrthoEngine v. 10.0.3 user guide*. Ontário, Canada: Richmond Hill, 2006.
- RODRIGUEZ, E.; MORRIS, C. S.; BELZ, J. E.; CHAPIN, E. C.; MARTIN, J. M.; DAFFER, S. *An assessment of the SRTM topographic products*. Pasadena, CA: JPL, 2005. 143 p.
- RUMBAUGH, J.; BLAHA, M.; PREMERLANI, W.; EDDY, F.; LORENSEN, W. *Modelagem e projetos baseados em objetos*. Rio de Janeiro/RJ: Campus, 1994.

- RUSS, J. C. *The image processing handbook*. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1998. 984 p.
- SHARY, P. A. *Local morphometric variables*. In: Peter Shary's Personal Website. Disponível em: <http://www.giseco.info/pb/wp_d4052550/wp_d4052550.html?0.7718744701805855>. Acesso em: 17/Mar/2008.
- TOUTIN, T. Elevation modelling from satellite visible and infrared (VIR) data. *International Journal of Remote Sensing*, v. 22, n. 06, p. 1097 – 1125, 2001.
- _____. Three-dimensional topographic mapping with ASTER stereo data in rugged topography. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 40, n. 10, p. 2241-2247, 2002.
- _____. Review article: Geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods. *International Journal of Remote Sensing*, v. 25, n. 10, p. 1893-1924, 2004a.
- _____. Comparison of stereo-extracted DTM from different high-resolution sensors: SPOT-5, EROS-A, IKONOS-II, and QuickBird. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 42, n. 10, p. 2121-2129, 2004b.
- _____. Generation of DSMs from SPOT-5 in-track HRS and across-track HRG stereo data using spatiotriangulation and autocalibration. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 60, n. 3, p. 170-181, 2006.
- _____. ASTER DEMs for geomatic and geoscientific applications: A review. *International Journal of Remote Sensing* v. 29, p 1855-1875, 2008.
- VALERIANO, M. M. Curvatura vertical de vertentes em microbacias pela análise de modelos digitais de elevação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 7, n. 3, p. 539 - 546, 2003.
- VALERIANO, M. M.; CARVALHO Jr., O. A. d. Geoprocessamento de modelos digitais de elevação para mapeamento da curvatura horizontal em microbacias. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, n. 1, ano 4, p. 17 - 29, 2003.
- VERSTAPPEN, H. T.; ZUIDAM, R. A. Van. *The ITC system of geomorphologic survey: a basis for the evaluation of natural resources and hazards*. Enschede, Netherlands: ITC, 1991. 89 p.
- WELCH, R.; JORDAN, T.; LANG, H.; MURAKAMI, H. ASTER as a source for topographic data in the late 1990's. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 36, n. 4, p. 1282-1289, 1998.
- ZUIDAM, R. A. Van. *Aerial photo-interpretation in terrain analysis and geomorphologic mapping*. Enschede: Smits Publishers, 1986. 449 p.

(Recebido em agosto / 08. Aceito em fevereiro / 09).