

Revista Brasileira de Cartografia (2014) N^o 66/2: 407-418
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

MAPEAMENTO GEOMORFOLÓGICO POR MEIO DE CLASSIFICAÇÃO BASEADA EM OBJETOS: ESTUDO DE CASO PARA A BACIA DO RIO SÃO JOÃO - RJ

*Geomorphological Mapping using Object-Based Classification: Study Case in São
João River Basin - RJ*

**Maria Luisa da Fonseca Pimenta¹; Raúl Sánchez Vicens²;
Felipe Mendes Cronemberguer² & Vinicius da Silva Seabra³**

¹Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ

Departamento de Geografia - Laboratório ESPAÇO

Av. Athos da Silveira Ramos, 274 - CEP: 21.941-916 - Rio de Janeiro/RJ, Brasil
pimenta.marialuisa@gmail.com

²Universidade Federal Fluminense – UFF

Departamento de Geografia - Laboratório de Geografia Física

Av. Litorânea, s/n, Campus Praia Vermelha - CEP: 24.210-340 - Niterói/RJ, Brasil
{felipecron, rsvicens}@gmail.com

²Universidade Estadual do Rio de Janeiro – UERJ

Departamento de Geografia

R. Dr. Francisco Portela, 1470 - CEP: 24.435-005 – São Gonçalo/RJ, Brasil
vinigeobr@gmail.com

*Recebido em 30 de Março, 2013/Aceito em 26 de Dezembro, 2013
Received on March 30, 2013/Accepted on December 26, 2013*

RESUMO

O objetivo desta pesquisa é apresentar os resultados metodológicos do mapeamento geomorfológico automatizado realizado por meio de Análise Baseada em Objetos (OBIA). Para tal, Modelos Digitais de Elevação (MDE's) gerados a partir do sensor *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER) e seus subprodutos foram usados em uma análise multirresolução baseada em objeto para discriminar características geomorfológicas da bacia de drenagem do rio São João, no Estado do Rio de Janeiro, que exhibe significativa geodiversidade. A classificação foi realizada através de redes semânticas hierárquicas oriundas da OBIA, incluindo a segmentação multirresolução e os modelos *fuzzy*, que foram utilizados a partir dos valores do terreno e de textura, além da relação com a vizinhança. A classificação gerada atingiu o nível de escala 1:100.000, definido como o nível taxonômico das formas de relevo, e qualitativamente mostrou significativa coerência com a geomorfologia regional, reconhecida pela pesquisa empírica. Para sua validação, buscou-se sobrepô-lo a mapeamento semelhante elaborado para a área obtido pelas ferramentas de análise espacial em um Sistema de Informação Geográfica (SIG). Notou-se que as formas geomorfológicas com menor gradiente são melhores detalhadas no SIG, principalmente aquelas que possuem formas lineares – correspondentes aos

vales em superfícies planas de várzea. Já as formas de vertentes são mais diferenciadas pela segmentação baseada em objeto e posterior classificação, destacando a possibilidade de tratamento de imprecisões nesta abordagem.

Palavras chaves: Análise Baseada em Objetos, Mapeamento Geomorfológico, Classificação Automática, MDE.

ABSTRACT

The aim of this research is to present the methodological results of the automatized geomorphological mapping using Object-Based Image Analysis (OBIA). Products of Digital Elevation Models (DEM's) generated from sensor Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) and related product were used in a multiresolution object-based analysis to discriminate geomorphologic features of São João drainage basin in the State of Rio de Janeiro, who holds significant geodiversity. The classification was performed on hierarchical semantic networks from the OBIA, including multiresolution segmentation and fuzzy models based on the analysis of terrain values, textural and neighboring features. The classification generated has attained the 1:100.000 scale level, defined as the taxonomic level of relief forms and qualitatively showed significant coherence with the regional geomorphology, recognized by empirical research. For validation, was sought the overlay with similar mapping for the area obtained by the spatial analyst tools in a Geographic Information System (GIS). It was noted that the geomorphological forms with lower gradient are best detailed in GIS, particularly those who has linear forms corresponding to valleys in lowland planar surfaces. Slope forms are better differentiated by object-based segmentation and subsequently classified, highlighting the possibility of treatment of inaccuracies in this approach.

Keywords: Object-Based Image Analysis, Geomorphological Mapping, Automatic Classification, DEM.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a inovação geotecnológica faz emergir mapeamentos temáticos diversos, resultantes das ferramentas de análises espaciais do Geoprocessamento e também do Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto. Esses produtos são considerados de suma importância para os estudos ambientais e a compreensão de fenômenos terrestres.

Dentre tais mapeamentos, pode-se destacar os geomorfológicos, que fornecem informações sobre o modelado da superfície terrestre e a sua dinâmica, essenciais para compreensão do funcionamento geoambiental de um sistema e a interação entre os diversos elementos abióticos naturais que compõem a paisagem.

Novas técnicas de aquisição por parte dos sensores remotos tem possibilitado a geração de Modelos Digitais de Elevação (MDE's), alguns de grande abrangência e disponibilização gratuita, como é o caso do ASTER e do SRTM. Tais modelos são considerados muito eficazes nos estudos de compartimentação do relevo, vindo a substituir as técnicas convencionais de mapeamento geomorfológico.

Neste contexto, a presente pesquisa objetiva contribuir metodologicamente para a Car-

tografia Geomorfológica a partir da elaboração de mapeamento temático realizado por meio de procedimentos automatizados de classificação por Análise Baseada em Objetos (OBIA¹) em sistemas computacionais especializados, empregando procedimentos hierárquicos, lógica *fuzzy* e modelagem do conhecimento.

Além disso, pretende-se também avaliar a performance dessa modelagem proposta comparando os resultados obtidos com outro mapeamento, em escala compatível. Este foi realizado através da manipulação de planos de informação constituídos por dados morfométricos também valendo-se de variáveis derivadas de MDE em ambiente de Sistemas de Informações Geográficas (SIG).

2. METODOLOGIA

A metodologia do presente mapeamento teve por base o ordenamento hierárquico de Ross (2005), buscando classificar as *formas de relevo*, uma unidade taxonômica relacionada a compartimentos hipsométricos interpretados por um padrão de formas esculturais semelhantes entre si, o que define como 4º táxon. Esta ordem de grandeza de fatos geomorfológicos possui uma relação intrínseca com a dimensão espacial e o grau de detalhe da pesquisa; no caso aqui

¹Utiliza-se neste artigo a sigla OBIA (do inglês *Object-Based Image Analysis*) como referência à análise baseada em objetos, pelo uso consagrado deste jargão no processamento digital de imagens

abordado, foi adotada a escala de tratamento 1:100.000 para a identificação das unidades de relevo.

Foi eleita como área-piloto a bacia hidrográfica do Rio São João, no estado do Rio de Janeiro (Figura 1), cuja área geográfica é de conhecimento prévio dos autores, apresentando paisagens diversas e configurando-se, assim, em uma ampla geodiversidade, representada pela variabilidade geomorfológica de acordo com Dantas (2001).

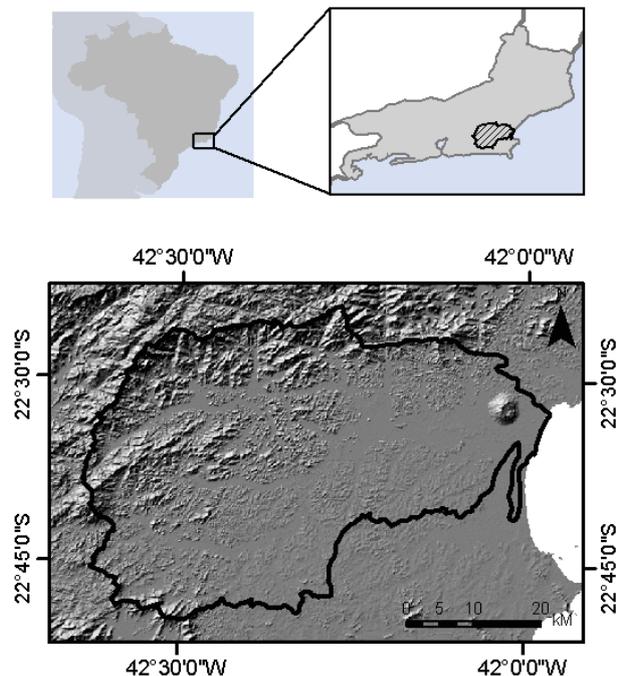


Fig. 1 - Mapa de localização da área de estudo.

Os dados morfométricos empregados nesta pesquisa foram extraídos do MDE proveniente do sensor *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER), a bordo do satélite Terra, lançado em 1999 pelo programa *Earth Observing System* da Nasa. Seu subsistema VNIR possui imageamento nas faixas espectrais eletromagnéticas do infravermelho próximo – bandas 3N e 3B – com telescópio independente que possibilita a visão estereoscópica (CAMARGO *et al.*, 2009). Os MDEs gerados são disponibilizados para livre transferência de dados com resolução radiométrica de 8 bits e resolução espacial de 30 m, no endereço eletrônico www.gdem.aster.ersdac.or.jp desde junho de 2009, com exatidão compatível com a escala a ser trabalhada, de acordo com Miceli *et al.* (2011).

Os MDEs, além de permitirem a visu-

alização tridimensional do espaço geográfico, admitem a extração de diversas variáveis morfométricas e texturais. Desta forma, os descritores adotados no processo de classificação foram os próprios dados de altitude e seus subprodutos: a declividade do terreno e o relevo sombreado (azimute 315°, altitude 45° e exagero vertical 1). Estes foram elaborados no programa *ArcGIS 9.3* através, respectivamente, das ferramentas *Slope* e *Hillshade*, que fazem parte do *3D Analyst Tools*, e posteriormente importados ao *Definiens Developer 7.0* (Figura 2).

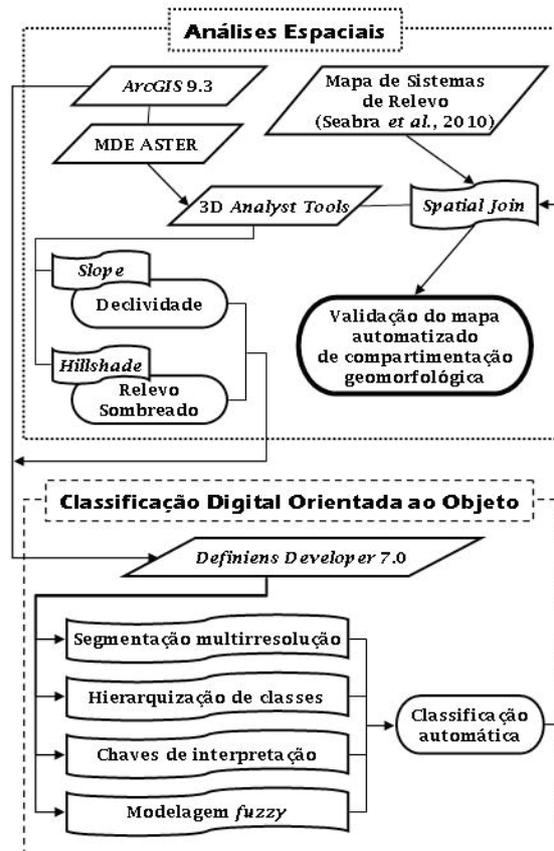


Fig. 2 - Fluxograma das etapas metodológicas.

O *Definiens* é um sistema computacional especialista (SE) que realiza tarefas de interpretação de imagens de Sensoriamento Remoto empregando estratégias de armazenamento e replicação do conhecimento por raciocínio heurístico; nele, por meio de modelos com base em malhas (*frames*), redes semânticas hierárquicas são estabelecidas em uma abordagem de OBIA, onde o objeto combina em uma única entidade sua estrutura (ou atributos) e seu comportamento (operações), estabelecendo ainda relações com os demais (CAMARGO, 2008).

Para a obtenção dos objetos de análise,

foi realizada uma segmentação baseada nas grades do relevo sombreado e da declividade, ambos gerados a partir do MDE do ASTER, processo este de multirresolução que permite segmentar uma ou mais imagens em níveis que se relacionam entre si. Ele é elaborado a partir de um algoritmo desenvolvido para extrair segmentos espectralmente homogêneos com base no valor do *pixel* e na forma do objeto, e que são definidos pelos planos de informação selecionados e por um parâmetro de escala, que determinará a heterogeneidade máxima permitida baseada no crescimento de regiões (DEFINIENS, 2007).

Objetivando analisar a informação semântica contida nos objetos, elaborou-se uma classificação supervisionada buscando o reconhecimento automático e o agrupamento em classes de compartimentos geomorfológicos preestabelecidas dado um conjunto de critérios consultados na literatura. Esta classificação do relevo embasou-se nas proposições de um dos teóricos clássicos da Geomorfologia russa, A. I. Spiridonov, quem fundamentou o conceito de dissecação vertical como a amplitude altimétrica entre a superfície terrestre e o topo das geoformas para reconhecimento de planícies, colinas, morros e montanhas (SPIRIDONOV, 1974). Assim, o estabelecimento da legenda do presente trabalho foi adaptada de mapas preexistentes consagrados para a região do Planalto Sudeste, quais também tiveram por base tal morfometria, a saber: Silva (2002) e IPT (1981).

Desta forma, foram usados critérios morfométricos e genéticos na presente classificação. A abordagem genética considera o predomínio de um processo geomorfológico sobre o outro, embora tanto os endógenos quanto os exógenos interajam na formação do relevo. A classificação genética proposta em 1946 pelo soviético I. P. Guerasimov (GERASIMOV, 1946) considera morfoestruturas como as formas de relevo com origem associada a processos endógenos (sistemas montanhosos, bacias intracratônicas etc.) e já as formas de relevo que resultam da ação de processos exógenos (dunas, planícies fluviais, depressões cársticas etc) denomina de morfoesculturas. No que diz respeito às classificações morfométricas,

estas analisam o relevo através da expressão quantitativa de determinadas características das feições ou dos processos formadores.

Na classificação, aqui apresentada, foram extraídos índices morfométricos dos dados quantitativos gerados a partir do DEM ASTER, como mostrados na Tabela 1. Os limiares de separação entre as classes de relevo foram adaptados para a área de estudo dos propostos por Spiridonov (1974, 1982) e formam parte dos resultados deste trabalho (Tabelas 3 e 4).

As redes hierárquicas estabelecidas entre as classes dizem respeito ao compartilhamento de atributos e operações entre os objetos, sendo que elas podem ser definidas de forma abrangente e depois refinadas em sucessivas subclasses mais detalhadas, herdando as características de sua superclasse e acrescentando suas próprias (RUMBAUGH *et al.*, 1994).

Assim, os limiares quantitativos propostos na bibliografia para classificação do relevo foram inicialmente testados através de análise exploratória de valores e ajustados para a área de estudo por interpretação qualitativa baseada em elementos de interpretação das imagens para a modelagem do conhecimento. Estes elementos são capazes de elaborar chaves (modelos) de interpretação que irão caracterizar um determinado objeto para então dar orientação à seleção de variáveis e seus atributos (FLORENZANO, 2008).

O algoritmo implementado (*Classification*) refere-se à identificação por descritores de classe, o qual permite a combinação de exigências. Nesta etapa classificatória, as classes sintetizam o significado semântico dos segmentos respondendo pelo agrupamento de objetos que atendem ao mesmo comportamento. Através dele, pode-se inserir múltiplas condições combinadas por operadores lógicos e utilizar funções de pertinência *fuzzy* (DEFINIENS, 2007).

A lógica *fuzzy* possui como característica a capacidade de tratar conceitos inexatos, definindo para cada objeto um conjunto de graus de pertinência (ZADEH, 1996) e neste trabalho utilizada com o operador lógico que tende a fornecer valores pequenos ou conservadores, já que possui a capacidade de definição por várias

condições atendidas simultaneamente.

Ademais, foi realizada uma validação da classificação automática resultante sobrepondo-a com mapeamento em escala compatível realizado por Seabra *et al.* (2010). Estes autores também utilizaram como dado de entrada o MDE do ASTER e, em SIG, classificaram compartimentos do relevo baseando-se na amplitude altimétrica e na declividade das encostas em objetos extraídos por método de detecção de bacias de 3ª ordem.

Para a comparação entre ambos os mapeamentos, utilizou-se a ferramenta *Spatial Join* do *3D Analyst Tools* do *ArcGIS 9.3*, que tem a propriedade da junção dos atributos das tabelas de diferentes planos de informação com base em suas localizações geográficas relativas. Assim, foi gerada uma matriz correlacional entre as áreas parciais de ambas as legendas, que são análogas e serão apresentadas na Seção 3, para que se soubesse em quais unidades estavam as maiores coincidências ou divergências.

Desta forma, foi gerada uma classificação automática da compartimentação geomorfológica para a bacia hidrográfica do rio São João, por Processamento Digital de Imagens (PDI) guiado por OBIA. Este resultado será neste trabalho apresentado sem a edição manual que implicitamente é indispensável para as mais diversas classificações por sistemas computacionais que trabalham com PDI, para que se demonstre sua potencialidade e o análise

criticamente frente ao processo em SIG, que possui maior interferência do operador.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Por seu caráter essencialmente metodológico, optou-se por apresentar como resultados o modelo adotado para a classificação proposta, além de sua avaliação crítica, frente às comparações sugeridas.

Metodologicamente, foram adotados dois níveis de segmentação em uma abordagem *top-down*. Para o primeiro nível (superobjetos) foram usadas as grades de declividade e relevo sombreado, conferindo um maior peso à primeira (0,8), com parâmetro de escala 100. Este nível, mostrado na Figura 3, objetivou a separação das principais macrounidades geomorfológicas, onde predomina uma determinada associação de processos.

O segundo nível foi gerado com os mesmos dados do nível anterior, diminuindo o parâmetro de escala para 30 na delimitação dos subobjetos. Estes detalham as formas de relevo e delimitam as unidades básicas de mapeamento, conforme exposto na Figura 4 – que, para efeito de comparação, é o mesmo recorte espacial da Figura 3. Em ambos os níveis foram atribuídos pesos maiores ao valor do *pixel* e à compacidade dos objetos (ambas 0,9), em detrimento da forma e suavidade (Tabela 2).

Tabela 1: Classificação hierárquica do relevo, segundo critérios genéticos e morfométricos.

Ordem hierárquica de classificação	Formas de relevo segundo a gênese	Tipos genéticos	Índices morfométricos	Classes de relevo
1ª Ordem	Morfoestruturas	» Estruturo-erosivas » Estruturo-denudativas » Acumulativas	» Altitude » Dissecação vertical » Declividade	» Planícies; » Relevo colinoso; » Relevo de morros; » Relevo montanhoso.
2ª Ordem	Morfoesculturas	» Fluviais (erosivas) » Aluviais » Coluviais » Residuais	» Dissecação vertical » Declividade	» Superfícies aluviais; » Colinas; » Morros residuais; » Montanhas.

Tabela 2: Parâmetros para segmentação das unidades geomorfológicas

Nível 1 – Limiar de similaridade: 100					
Nível 2 – Limiar de similaridade: 30					
Planos de informação	peso	cor	forma	compacidade	suavidade
Declividade	0,8	0,9	0,1	0,9	0,1
Relevo sombreado	0,2				

Os parâmetros finais de segmentação foram escolhidos após sucessivos testes para apreciação dos objetos gerados. Entendeu-se que o maior peso atribuído às declividades foi decisivo para isolar distintos compartimentos do relevo que possuem em suas quebras naturais esta característica intrínseca, com seus sopés e interflúvios; assim como o baixo valor destinado à forma revelou que a homogeneidade dos valores de declividade contribuem significativamente na criação de segmentos compactos.

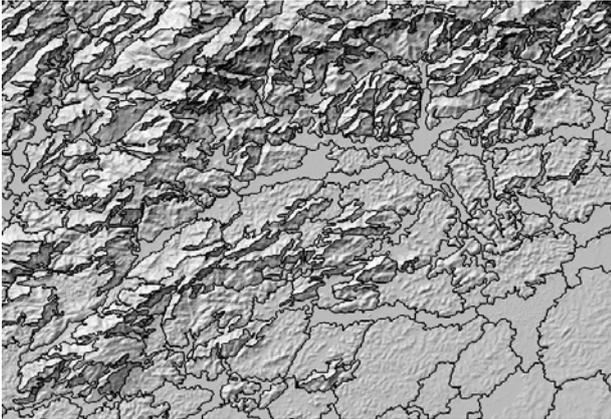


Fig. 3 - Exemplificação da segmentação em superobjetos.

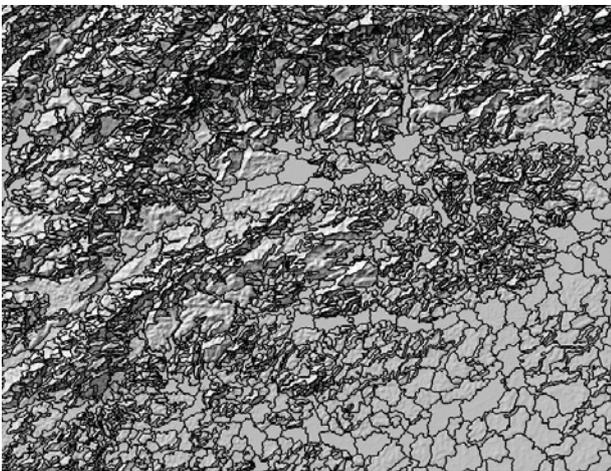


Fig. 4 - Exemplificação da segmentação em subobjetos.

O emprego de dois níveis de segmentação, diferenciando-se em limiares de heterogeneidade, foi necessário, pois, somente naquele de menor detalhamento as informações de amplitude altimétrica puderam ser utilizadas para a compartimentação na posterior etapa classificatória aplicada. Devido à dependência entre os

limites dos objetos, aqueles gerados no segundo nível são restringidos pelas bordas preexistentes e apresentaram assim refinamento para a maior escala cartográfica a ser trabalhada; ou seja, são topologicamente definidos e conectados de maneira hierárquica.

Em nível semântico-interpretativo das formas do relevo, utilizando-se das grades de elevação e declividade, a classificação a partir de chaves de interpretação deu-se por um conjunto de elementos que caracteriza determinado complexo de objetos e assim sistematiza e orienta o processo de análise e identificação de feições para agrupamentos em função da estrutura de dados e de comportamento similares.

A classificação também se desenvolveu com base no relacionamento hierárquico aplicado em rede semântica e por lógica *fuzzy*. Assim, além da capacidade de tratar conceitos inexatos, definiu-se para cada objeto um conjunto de seus respectivos graus de pertinência empregando operadores lógicos para relacioná-los; neste caso, utilizou-se o *AND* para que atendessem concomitantemente a todas expressões inseridas nas classes.

Nesta etapa, também foram geradas classificações em dois níveis hierárquicos, um para cada nível de segmentação. No primeiro nível, o tamanho dos objetos gerados permitiu que fosse atribuída a amplitude altimétrica como critério balizador da individualização de grandes unidades geomorfológicas (Tabela 3).

Além das características do objeto relacionadas às variáveis geomorfológicas, definidas pelos valores das grades de elevação e declividade, foi utilizada a semelhança invertida para uma determinada classe para evitar áreas não classificadas, denominado critério de não-pertinência.

O que se fez notar foi que as superfícies acumulativas, correspondentes às planícies aluviais de baixadas na bacia, foram as melhor definidas pelo baixo valor altimétrico e de declividade. O limite de 200 m na média altimétrica evitou confusões com os vales inseridos no compartimento de relevo montanhoso.

Além disso, para a diminuição das confusões entre os relevos de morros e o montanhoso, foi estabelecido o limiar de 400 m

de altitude absoluta para a separação entre estas classes. E, ainda, para refino do relevo de morros estruturo-denudativos, foi acrescido o atributo de declividade, pois tal classificação estava sendo

atrelada às superfícies acumulativas quando estas encontravam-se entremeadas a patamares elevados.

Tabela 3: Atributos da compartimentação geomorfológica em primeiro nível.

		Superfícies acumulativas	Relevo colinoso erosivo-acumulativo	Relevo de morros estruturo-denudativo	Relevo montanhoso estruturo-denudativo
Variáveis Geomorfológicas	Amplitude altimétrica	-	< 100 m	100 – 400 m	> 400 m
	Máxima altitude	< 200 m	-	< 400 m	> 400 m
	Média de declividade	< 3°	-	> 12°	-
Relações entre classes	Não-pertinência	-	Todas	-	-

Em um segundo nível de classificação, mantendo-se a hereditariedade dos descritores e modelos das classes do nível superior, foram inseridas condições mais complexas de reconhecimento de objetos, tendo em vista o maior grau de especificidade da legenda – a

saber: descritores de textura, que avaliam a quantização de valores, e relações de borda, aplicados, respectivamente, para identificação das planícies e correção de erros de comissão no domínio das montanhas (Tabela 4).

Tabela 4: Atributos das formas de relevo em segundo nível de classificação

Nível 1	Nível 2	Variáveis Geomorfológicas		Variáveis Texturais			Relações entre classes	Relações com vizinhos
		Amplitude altimétrica	Média de declividade	Homogeneidade	Segundo momento angular	Entropia	Não-pertinência	Média da diferença altimétrica
Superfícies acumulativas	Planícies aluviais	< 20 m	< 3°	-	> 0,01	-	-	-
	Superfície ondulada	-	-	-	-	-	Planícies aluviais	-
Relevo colinoso erosivo-acumulativo	Planícies aluviais	-	< 3°	> 0,2	-	-	-	-
	Colinas dissecadas	-	-	-	-	-	Planícies aluviais	-
Relevo de morros estruturo-denudativos	Planícies aluviais	-	< 3°	-	-	< 6	-	-
	Morros residuais	-	-	-	-	-	Planícies aluviais	-
Relevo montanhoso estruturo-denudativo	Vales intramontanos	-	< 10°	-	-	< 6	-	< 0
	Montanhas baixas	-	-	-	-	-	Vales intramontanos	-

Pode-se notar que as planícies aluviais e os vales intramontanos foram muito bem definidos por descritores que representam a textura dos objetos segundo seus valores de altitude, tanto os que são capazes de medir a uniformidade da textura (homogeneidade), quanto aqueles que medem a desordem e o grau de dispersão dos valores (entropia); conforme assinalado por Camargo (2008).

Adiciona-se que em relação aos patamares mais elevados do relevo (morros residuais e montanhas baixas) a melhor diferenciação das planícies para as encostas foi a variável tradutora da energia, enquanto que para as superfícies baixas onduladas e as colinas dissecadas, tiveram melhor desempenho as variáveis de medição da repetição de um valor de pixel.

Para maior refinamento dos vales intramontanos, estes receberam um descritor de relacionamento com a vizinhança que evidencia o encaixamento de alvéolos entre as escarpas através da média da diferença altimétrica com os objetos que tocam um raio de 15 pixels (450 m) no seu entorno sendo inferior à zero. Estas formas correspondem aos vales aluviais mais íngremes, e o modelo de restrição pela declividade abrangeu até valores de 10°, enquanto que as planícies aluviais dos restantes compartimentos, a declividade média não ultrapassa os 3°.

Já as planícies aluviais provenientes das superfícies acumulativas distinguiram-se pelas baixas declividades (inferiores à 3°), já que muito se assemelham às superfícies baixas onduladas, tendo ainda que incorporar um descritor de amplitude altimétrica menor que 20 m para seu melhor refinamento.

No domínio colinoso, as planícies aluviais foram distinguidas das colinas dissecadas pela declividade menor que 3° e valores de homogeneidade altimétrica superiores a 0,2. Já no compartimento de relevo de morros estruturodenudativos, além da declividade média, as planícies foram separadas das encostas através de um limiar de entropia, ficando restrita a valores inferiores a 6.

Outro aspecto relativo às redes semânticas hierárquicas foi a possibilidade da inserção de subclasses que representaram erros de classificação. Então, para o aprimoramento das classes, foram empregados novamente os limiares que definiam tais feições no nível

anterior, assim como foram inseridos novos descritores, gerando classes de acertos e classes de erros comissão (Tabela 5).

Alguns vales intramontanos que se localizavam nas periferias das superfícies acumulativas, bordejando as montanhas baixas, tiveram a variável de relacionamento com os objetos vizinhos novamente aplicada (média da diferença altimétrica inferior à zero) para que fossem corretamente classificadas.

No primeiro nível de classificação, o relevo de morros e o relevo montanhoso tiveram a eles acoplados erros de comissão referentes a patamares inferiores do relevo, que foram indevidamente inseridos pois encontravam-se entremeados aos superiores nos superobjetos. Foram assim definidas, com base na segmentação de maior detalhe, novas subclasses e aplicados novamente os critérios de morros residuais, sendo o restante fixado como colinas dissecadas; assim como os morros residuais foram diferenciados das montanhas baixas pela amplitude altimétrica e a máxima altitude.

O novo critério inserido – relação de borda – faz referência às adjacências dos objetos considerados. Verificou-se que a classificação de morros residuais estava superestimada e, para correção, foi aplicada tal variável em relação às montanhas baixas. Assim, após a fusão dos objetos referentes aos morros (*Merge*), estes só se mantiveram assim classificados se apresentassem circunvizinhança de montanhas inferior à 50%.

Para avaliar a performance do modelo proposto (Figura 5), em uma segunda etapa, comparou-se o mapeamento produzido com outro produto em escala similar, realizado através de análise espacial de dados geográficos em ambiente SIG por Seabra *et al.* (2010), que identificou os sistemas de relevo da bacia do Rio São João e que apresentou compatibilidade na legenda (Tabela 6). Os autores apresentam emprego de critérios *booleanos* e, cabe salientar, aplicação de filtros de generalização e edição manual.

A partir do entrecruzamento de ambos os mapeamentos, gerou-se uma matriz correlacional entre as legendas que possibilitasse a análise das coincidências e divergências entre as áreas parciais correspondentes item a item (Tabela 7).

Nesta comparação, um dos valores percentuais mais altos de coincidência

encontrados (82,6%) foi aquele referente ao entrecruzamento das Planícies Aluviais e do Relevo Plano, entendendo-se que esta feição geomorfológica possui como critério balizador em ambas as classificações as baixas declividades - por volta de menos de 3° - e na paisagem se diferenciam sobremaneira do relevo em seu entorno.

Contudo, chamaram atenção as áreas de confusão do Relevo Plano com as Colinas Dissecadas (21,5%) e a Superfície Baixa Ondulada (15,8%). A partir de sua sobreposição

em SIG (Figura 6), observou-se que algumas das planícies estreitas que se desenvolvem, sobretudo no baixo curso do rio São João, não foram individualizadas em objetos no processo de segmentação automatizada da OBIA. Somente no mapeamento elaborado por Geoprocessamento, onde houve edição vetorial dos polígonos, é que estas feições puderam atingir o nível de detalhamento que alcançava a detecção de segmentos interstícios às encostas nos patamares inferiores do relevo.

Tabela 5: Refinamento de erros de comissão inseridos em classes

Inserção equivocada em	Classificação correta	Parâmetros
Superfícies Acumulativas	Vales intramontanos	Média da diferença com os vizinhos < 0
Relevo de morros estruturo-denudativo	Colinas dissecadas	Não pertinência à classe morros residuais
Relevo montanhoso estruturo-denudativo	Morros residuais	Amplitude altimétrica < 400 m e máxima altitude < 400 m
Morros residuais	Montanhas baixas	Relação de borda com as montanhas baixas > 0,5

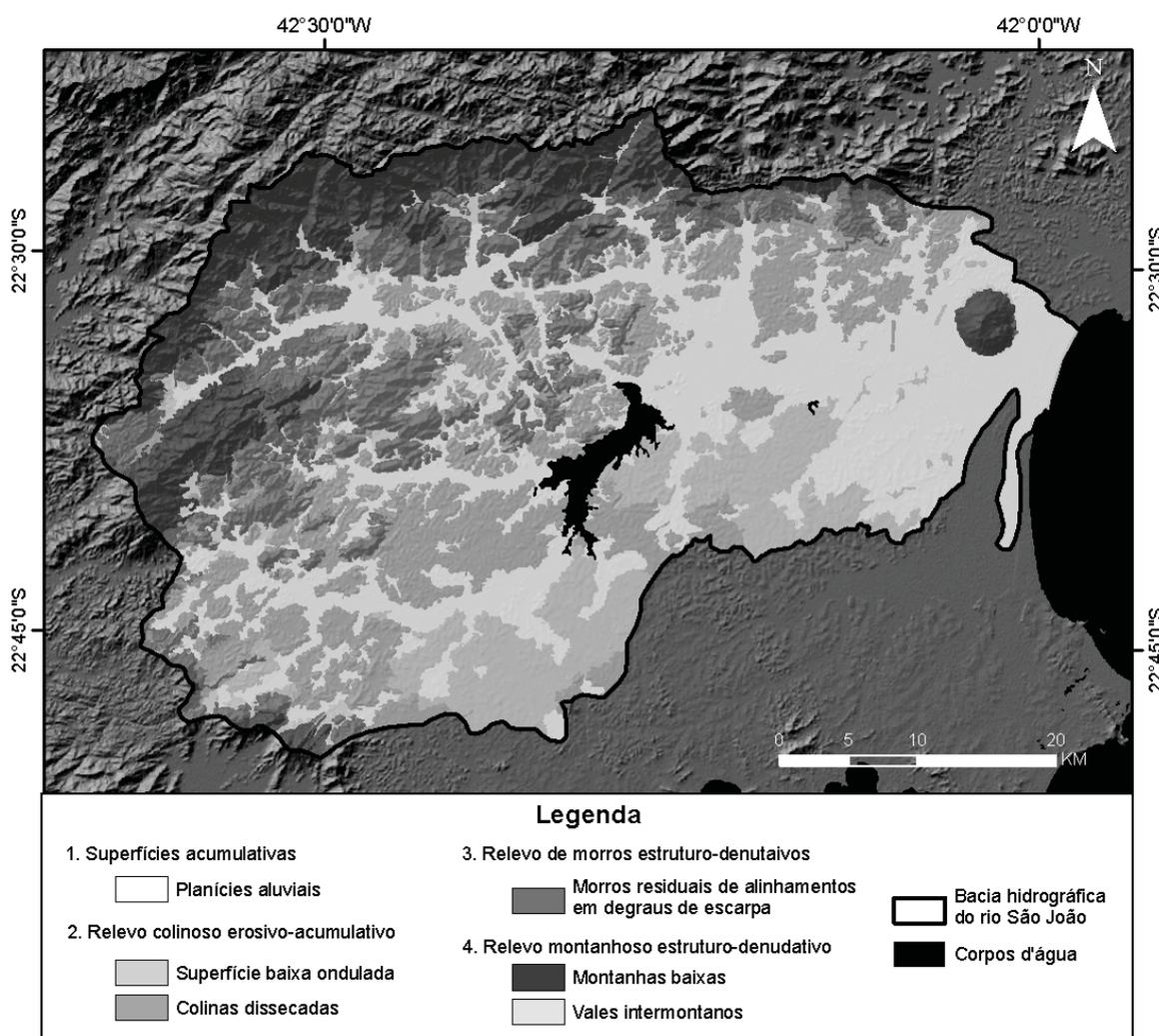


Fig. 5 - Mapeamento geomorfológico derivado do modelo OBIA.

Tabela 6: Parâmetros geomorfométricos para os diferentes mapeamentos

OBIA - lógica fuzzy		SIG - lógica booleana	
Planícies Aluviais	Declividade < 3°	Amplitude < 40m, declividade 0-5%	Relevo Plano
Superfície Baixa Ondulada	-	não há correspondência direta	
Colinas Dissecadas	Amplitude < 100 m	Amplitude < 40m, declividade 5-15%	Relevo Colinoso
	não há correspondência direta	Amplitude 40-100m, declividade > 15%	Relevo de Morrotes
Morros Residuais	Amplitude 100-400 m, Altitude < 400 m, > 12°	Amplitude 100-300m, declividade >15%	Relevo de Morros
Montanhas Baixas	Amplitude > 400 m, Altitude > 400 m	Amplitude > 300m, declividade > 15%	Relevo Montanhoso
Vales Intramontanos	Amplitude > 400 m, Altitude > 400 m, declividade < 10°, entropia < 6	-	-

Tabela 7: Matriz correlacional de áreas parciais das diferentes legendas

	Relevo Plano	Relevo Colinoso	Relevo de Morrotes	Relevo de Morros	Relevo Montanhoso
Planícies Aluviais	0,826	0,128	0,020	0,016	0,010
Superfície Ondulada	0,158	0,806	0,005	0,012	0,019
Colinas Dissecadas	0,215	0,369	0,255	0,115	0,046
Morros Residuais	0,082	0,002	0,047	0,199	0,670
Vales Intramontanos	0,431	-	0,022	0,002	0,544
Montanhas Baixas	0,003	0,002	-	-	0,994

Outro alto valor percentual encontrado diz respeito à confusão entre Superfície Baixa Ondulada e Relevo Colinoso (80,6%), entendível por Seabra *et al.* (2010) não considerar uma classe que distinga formas colinosas suaves, de acordo com a Tabela 6. O que se deve observar é que 12,8% do Relevo Colinoso foi identificado no interior das Planícies Aluviais (Figura 7), em áreas onde se apresentam as já citadas feições suavizadas. Nestas, os descritores de textura utilizados em OBIA não tiveram a competência de identificá-las por evidenciarem limiares muito próximos às planícies.

As coincidências entre Colinas Dissecadas e Relevo Colinoso apresentaram-se relativamente baixas (36,9%) uma vez que para Seabra *et al.* (2010) a classe de Relevo de Morrotes (25,5%) possui um limiar que está nela contido (de acordo com a Tabela 1). O que se faz notar é a sua confusão com o Relevo de Morros (Figura 8), em torno de 11,5%; buscando-se esta avaliação, percebeu-se que a detecção destas formas é mais detalhada em OBIA do que no método em SIG. Ou seja, uma vez que nas áreas de sobreposição das duas classes os valores morfométricos referiam-se às Colinas ou Morrotes, percebeu-se que a segmentação elaborada sobre o relevo sombreado e a grade de declividade teve maior capacidade de identificar vertentes para posteriormente classificá-las.

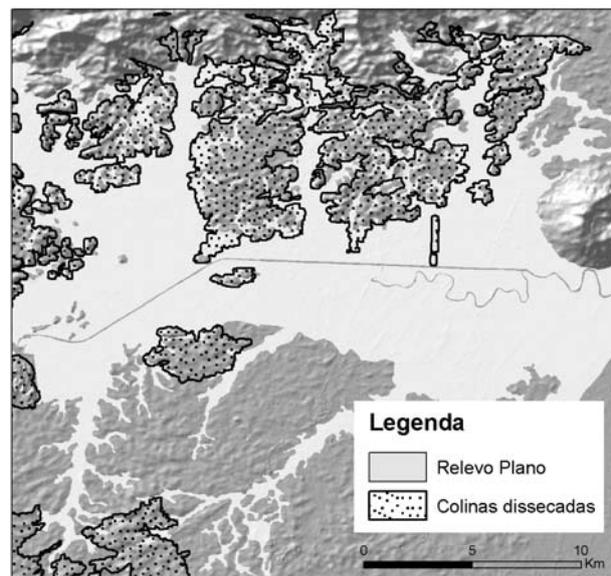


Fig. 6 - Comparações espaciais das confusões (setas) entre Relevo Plano (SIG) e Colinas Dissecadas (OBIA).

No que se refere às montanhas, 99,4% do Relevo Montanhoso coincidiu com as Montanhas Baixas; contudo, houve uma discrepância nos limiares de amplitude altimétrica para estas classes (Tabela 6) que fez com que 67% do Relevo Montanhoso estivesse coincidente com os Morros Residuais.

Ademais, a classe de Vales Intramontanos, estreitas planícies que se desenvolvem encaixadas nas montanhas, concordou-se com o Relevo Plano (43,1%) e o Relevo Montanhoso (54,4%),

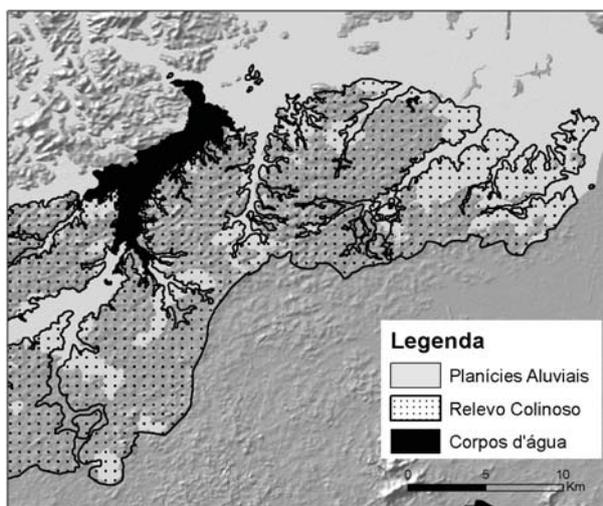


Fig. 7 - Comparações espaciais das confusões (setas) entre Planícies Aluviais (OBIA) e Relevo Colinoso (SIG).

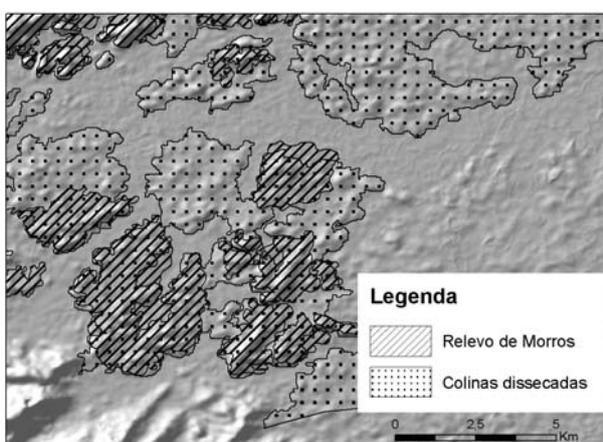


Fig. 8 - Comparações espaciais das confusões (setas) entre Relevo de Morros (SIG) e Colinas Dissecadas (OBIA).

já que no mapeamento em SIG elas não foram extraídas, salientando mais uma vez a maior habilidade da OBIA quando se trabalha nos patamares superiores do relevo.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho, a utilização do MDE ASTER e demais grades derivadas mostrou-se eficiente no estudo da variedade de fenômenos geomorfológicos expostos na bacia do rio São João a partir da extração de dados morfométricos e texturais. O processo de modelagem, apesar de trabalhoso, depois de conhecido, amplia a capacidade de geração de mapeamentos correlatos, se constituindo em uma opção de alta potencialidade no mapeamento geomorfológico.

Os algoritmos de segmentação multir-

resolução e classificação, baseados em OBIA e hierarquização, exibiram bons resultados sobre a diversidade de formas de relevo; sendo essencial a manipulação dos diversos descritores sob lógica *fuzzy*, bastante explorada na definição das chaves de interpretação ao longo de todo o processo de mapeamento. Observou-se também que a segmentação adequada dos objetos é de extrema importância para isolá-los em polígonos que irão comportar as informações utilizadas na classificação.

O entrecruzamento com mapeamento similar para a área elaborado por metodologia ancorada em SIG possibilitou uma análise crítica do produto gerado e mostrou que as porções de topografia mais suavizadas (planícies e superfícies onduladas) são mais bem individualizadas a partir da manipulação de dados em Geoprocessamento do que com o processo automático de segmentação em OBIA; enquanto que nas áreas de modelado de relevo em encostas, estas são identificadas com maior precisão quando utiliza-se o PDI.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às instituições de fomento CNPq e CAPES pelo apoio através da concessão de bolsas de estudo e pelo auxílio financeiro ao desenvolvimento do projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTER. Advanced Spaceborne Thermal and Reflection Radiometer. **Modelo Digital de Elevação: S23W42 e S23W43**. Disponível em: <<http://gdem.ersdac.jspacesystems.or.jp/>>. Acesso: 13 março 2009.

CARMARGO, F. F. **Análise Orientada ao Objeto Aplicada ao Mapeamento de Unidades Geomorfológicas a partir de Dados ASTER/Terra**. São José dos Campos, 2008. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 161p.

CAMARGO, F. F.; ALMEIDA, C. M.; FLORENZANO, T. G.; OLIVEIRA, C. G. **Acurácia Posicional de MDE ASTER/Terra em Área Montanhosa**. *Geomática* 4 [1] (Online): 12-24, 2009. Disponível em <<http://w3.ufsm.br/rgeomatica/page4/02.pdf>>. Acesso em: 11 março 2013.

- DANTAS, M. E. **Mapa Geomorfológico do Estado do Rio de Janeiro**. Brasília, Serviço Geológico do Brasil, 2001.
- DEFINIENS. **Definiens Developer 7: Reference Book**. Munich, Definiens (The Imaging Intelligence Company), 2007. 197p.
- FLORENZANO, T. G. Sensoriamento Remoto para Geomorfologia. In: FLORENZANO, T.G (Org.) **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo, Oficina de Textos, 2008. Cap. 2, p. 36-72.
- GERASIMOV, I. P. *Opyt geologiceskogo strojenija SSRR. Problemy fiziceskoj geografii*, 12, Moskva – Leningrad. pp 33-46.
- IPT. Instituto de Pesquisas Tecnológicas. **Mapa Geomorfológico do estado de São Paulo**. São Paulo, Divisão de Minas e Geologia Aplicada, 1981. 103p.
- MICELI, B. S.; DIAS, F. M.; SEABRA, F. M.; SANTOS, P. R. A.; FERNANDES, M. C. Avaliação Vertical de Modelos Digitais de Elevação (MDEs) em Diferentes Configurações Topográficas para Médias e Pequenas Escalas. **Revista Brasileira de Cartografia**, 63, 2011.
- RUMBAUGH, J.; BLAHA, M.; PREMERLANI, W.; EDDY, F.; LORENSEN, W. **Modelagem e projetos baseados em objetos**. Rio de Janeiro, Campus, 1994. 652p.
- ROSS, J. L. S. **Geomorfologia: ambiente e planejamento**. São Paulo, Contexto, 2005. 85p.
- SEABRA, V. S.; CRUZ, C. B. M.; VICENS, R. S. **Mapeamento dos Sistemas de Relevo da Bacia Hidrográfica do Rio São João**. In: III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Recife, 2010. Anais, p. 001-004. Disponível em: <http://www.ufpe.br/cgtg/SIMGEOIII/IIISIMGEO_CD/index.htm>. Acesso: 11 março 2013.
- SILVA, T.M. **A Estruturação Geomorfológica do Planalto Atlântico no Estado do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro, 2002. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. 265p.
- SPIRIDONOV, A. I. **Cartografía geomorfológica**. Editorial Nedra, 1974. 182 p.
- SPIRIDONOV, A. I. **Metodología general de las investigaciones geomorfológicas y la cartografía geomorfológica**. La Habana: Ed. Universidad de La Habana, 2 t, 1982.
- ZADEH, L. A. Fuzzy sets and systems. In: KLIR, G. J.; YUAN, B. (Org.). **Advances in fuzzy systems - applications and theory: fuzzy sets, fuzzy logic and fuzzy systems**. Binghamton, World Scientific, 1996, p. 35-37.