

ESTIMATIVA DA AMPLITUDE TOPOGRÁFICA POR GEOPROCESSAMENTO DE DADOS SRTM PARA MODELAGEM DO RELEVO

Viviana Aguilar Muñoz^{1, 2}
Márcio de Morisson Valeriano^{1, 3}

Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento do cálculo automatizado da amplitude topográfica por geoprocessamento como contribuição à análise da topografia com vistas ao estudo das relações solo-relevo. A despeito de sua importância como descritor do relevo, a amplitude é uma variável pouco explorada nos trabalhos conduzidos em geoprocessamento em parte devido à ausência de algoritmos para seu cálculo entre os recursos de Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Motivados pela disponibilidade de Modelos Digitais de Elevação (MDE), a partir da difusão dos dados da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) e do Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil (TOPODATA), os elementos implícitos em seu conceito foram adaptados em processos de vizinhança e sobreposição, por sua vez estruturados em programa de lote. Os dados de solo foram obtidos do levantamento pedológico semidetalhado do Estado de São Paulo (escala 1:100.00): mapa e memorial descritivo da quadricula São Carlos. Além da viabilidade da abordagem adotada, os resultados mostraram que a amplitude topográfica evidencia distintamente feições de expressão regionalizada como patamares, baixios e escarpas, de acordo com os intervalos de variação considerados na classificação dos resultados numéricos. As feições evidenciadas apresentaram correspondência notável com a distribuição de manchas de solos e seus limites mapeados, numa indicação do potencial de contribuição para o levantamento em áreas não mapeadas.

Palavras-chave: Geomorfometria. SRTM. TOPODATA. Geoprocessamento. Amplitude topográfica. Solos.

Abstract

Internal relief estimate by SRTM data geoprocessing to relief modeling

This work presents the development of the automated calculus of the internal relief through geoprocessing, as a contribution for terrain analysis aiming at the study of soil-relief relations. Despite its importance as terrain descriptor, internal relief is seldom considered in studies under geoprocessing approach, partly due the absence of algorithms among basic Geographical Information System (GIS) resources. Motivated by the availability of Digital Elevation Model (DEM), given by the diffusion of both SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) data and Brazilian Geomorphometric Data Base (TOPODATA), the implicit conceptual elements were adapted into neighborhood and overlay operations, stored in macro program. The semi-detailed map of the pedologic survey of São Paulo State (1:100.000 scale) of the study site, at São Carlos quad, and respective documentation were used as the source of soil data. Beside the feasibility of the adopted approach, results showed the internal relief to distinctly enhance regionalized features like plateaus, lowlands and scarps, according to the intervals applied in the classification of the numerical results. The enhanced features were notably related to the distribution of soil types and their mapped boundaries, as an indication of the contribution potential for soil survey in non-mapped areas.

Key words: Geomorphometry. SRTM. TOPODATA. Geoprocessing. Internal relief. Soils.

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE - Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil – E-mail: {viaguila, valerian}@dsr.inpe.br

² Bolsista da CAPES/CNPq – IEL Nacional - Brasil

³ Pesquisador bolsista CNPq

INTRODUÇÃO

A geomorfometria (*geomorphometry*), conhecida também como análise do terreno (*terrain analysis*), geomorfologia quantitativa (*quantitative geomorphology*), ou modelagem digital do terreno (*digital terrain modelling*), é uma sub-disciplina da geomorfologia (*geomorphology*) que tenta descrever quantitativamente as formas da superfície pelo uso conjunto de matemáticas, engenharia, ciências da terra e da computação (MARK, 1975; PIKE, 2000). Segundo Mark (1975), a superfície não está representada apenas por uma única característica geométrica, mas por um conjunto de variáveis passíveis de medição, conhecidas como variáveis geomorfométricas. Evans (1972) e Mark (1975) consideraram que as variáveis geomorfométricas são de duas naturezas: (i) local, quando seu cálculo está definido em todos os pontos da superfície e os valores em cada ponto dependem das elevações da sua vizinhança; e (ii) regional, quando sua medição depende dos valores extremos na distribuição (dispersão) das elevações dentro de uma subárea finita de uma superfície; os resultados são sensíveis a pequenas variações na estimação desses extremos.

As variáveis geomorfométricas regionais têm sido menos exploradas do que as locais por sua natureza mais complexa; porém, são atributos muito importantes na caracterização do relevo e na sua estratificação em regiões. A amplitude topográfica é uma das variáveis geomorfométricas regionais mais conhecidas em estudos do meio físico. Segundo Evans (1972), esta pode ser interpretada como a dimensão vertical da topografia descrita com o termo *relevo (relief)*. Para Mark (1975) trata-se da diferença entre a maior e a menor elevação que ocorrem dentro de uma área finita da superfície terrestre; este autor utiliza o termo *relevo local (local relief)* para se referir à amplitude. Meijerink (1988) utiliza o termo *relevo interno (internal relief)* e formula que a amplitude é a expressão da diferença de altitude entre os divisores de água, ou os topos da vertente, e os talvegues dentro de uma unidade de mapeamento. Esta variável é conhecida também como *relevo relativo (relative relief)* porque pode ser calculada a partir das alturas, ou cotas relativas a um nível diferente do nível médio do mar (GUERRA, 1993). Segundo Peloso e Valeriano (2008) a estimativa da amplitude por SIG pode ser baseada na percepção de duas superfícies: um nível de base e um nível de topos (ou, quando há aplainamento, nível de patamar ou planalto), por sua vez estimados, respectivamente, como a cota mínima e máxima encontrada dentro de um raio de busca.

A altitude é o dado fundamental para o cálculo das variáveis geomorfométricas. Em estudos de escalas detalhadas esta pode ser medida diretamente em campo por topografia convencional, o qual representa custos desnecessários para aplicações em escalas menores. Curvas de nível, obtidas por *foto-restituição*, são uma alternativa a essas implicações de escala, mas elas ainda não representam uma superfície contínua (com cota em todos os pontos). Pela interpolação de cotas altimétricas (pontos topográficos ou curvas de nível) é possível construir um Modelo Digital de Elevação (MDE), que forma uma representação contínua da superfície do terreno; estes também são construídos pela aplicação de tecnologia e ferramentas de Sensoriamento Remoto, tais como estereoscopia e interferometria. Os MDE são arquivos de cotas altimétricas estruturadas em linhas e colunas referenciadas em correspondência à sua posição geográfica, do mesmo modo que imagens de satélite, e são tratados mediante diversos recursos de estruturação, análise e consulta dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Segundo Burrough e McDonnel (1998) a partir desses modelos se derivam as informações topográficas em ambiente de SIG, e para conseguir uma representação mais detalhada do terreno são preferidos os MDE de maior resolução espacial. Desde meados de 2003, o Brasil conta os dados altimétricos na forma de MDE, em resolução que atende demandas de escalas semi-detalhadas, e em cobertura por todo o território nacional, de acesso livre, fornecidos pela missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), que foram posteriormente refinados e derivados no projeto TOPODATA (VALERIANO, 2008).

Uma vez estruturados à semelhança das imagens orbitais, os modelos numéricos do terreno são passíveis de operação por recursos SIG como a segmentação e a classificação de imagens.

Com o propósito de contribuir no desenvolvimento da modelagem e interpretação do relevo para aplicação em estudos do meio físico, este trabalho teve três objetivos principais: (i) desenvolver um algoritmo para extração da amplitude topográfica na sua forma numérica, por geoprocessamento dos MDEs SRTM e TOPODATA, (ii) propor um esquema de classificação desta variável para sua representação qualitativa, e (iii) avaliar as possíveis relações entre a amplitude e solos da área de estudo.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo

O algoritmo para a extração da amplitude topográfica foi testado sobre os valores da altitude correspondentes à quadrícula São Carlos, interior do Estado de São Paulo, identificada com o código SF.23-Y-A-I do sistema cartográfico brasileiro, na escala 1:100.000. A área se enquadra entre os paralelos 22°S e 22°30'S e os meridianos 48°W e 47°30'W, como se ilustra na figura 1.

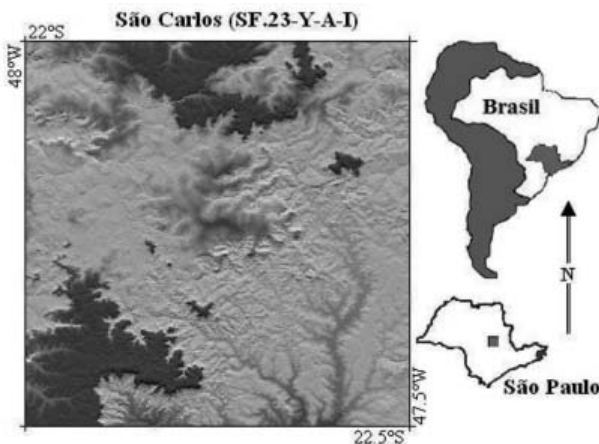


Figura 1 - Localização da área de estudo

Destacam-se nesta região os serrotes de Santa Bárbara e Itaguaçu; as serras de São Carlos, Monte Sinai, Atalaia, Cachoeira, São Pedro, Itaqueri, dos Padres e a Serra Grande; os rios Jacaré-Guaçu, Ribeirão do Feijão, Ribeirão do Lobo, Ribeirão Itaqueri, Corumbataí e Passa Cinco; e a Represa do Lobo (IBGE, 1969; IBGE, 1971). Predomina material basáltico e arenitos de idade mesozóica e paleozóica, siltitos e argilitos do paleozóico, intrusões quaternárias de areias, argilas e arenitos da Formação Rio Claro, aluviões do quaternário, granitos e gnaisses de idade cambriana e pré-cambriana (BRASIL, 1983). Os solos são principalmente Latossolos, solos Podzólicos (Argissolos), Areias Quartzosas (Neossolos Quartzareníticos), solos Litólicos (Nitossolos Litólicos), Hidrossolos (Gleissolos Melânicos e Háplicos), Terra Roxa Estruturada (Nitossolos Vermelho) (PRADO et al., 1981;

IBGE, 2007). A região pertence ao sudeste do Brasil, classificada como sub-úmida e úmida, tipo tropical, com um a dois meses secos (NIMER, 1979). A temperatura média histórica anual oscila entre 18,1°C e 20°C e a precipitação média histórica anual oscila entre 1751 mm e 2000 mm (MENDOÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007). A vegetação natural está representada em savanas (cerrado), com vegetação arbórea densa, aberta e gramíneo-lenhosa; floresta estacional semi-decidual, com floresta de montanha e vegetação secundária sem palmeiras; e no contato entre estes dois domínios acham-se pequenas áreas de tensão ecológica. A agricultura ocupa áreas dos três domínios florestais e está representada principalmente em pastagens e culturas cíclicas – permanentes de cana, café, eucalipto e pinheiro (BRASIL, 1983; IBGE, 1969; IBGE, 1971).

Dados

Para avaliar o desempenho do algoritmo em relação à escala, este foi aplicado sobre os dados SRTM e TOPODATA. O SRTM é um MDE que representa aproximadamente o 80% da superfície da terra, obtido por interferometria a partir de dados de radar, banda C (FARR; KOBRIK, 2000). O modelo SRTM com 90m de resolução (ou SRTM3), correspondente à área de estudo, foi coletado no endereço <ftp://e0srp01u.ocs.nasa.gov/srtm/version2/> do JPL (*Jet Propulsion Laboratory*). Neste banco os dados estão disponíveis em formato HGT, organizados continente a continente em células individuais que cobrem áreas de 1°x1° em latitude e longitude. TOPODATA é um banco de dados nacional (do Brasil) de variáveis geomorfológicas locais, recentemente publicado, resultante da avaliação e modelagem de dados SRTM (VALERIANO, 2008). O MDE do banco TOPODATA, com 30m de resolução, foi coletado no endereço <http://www.dpi.inpe.br/topodata/acesso.php> da DSR (Divisão de Sensoriamento Remoto) do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). Estes dados estão disponíveis nos formatos DOC, IMG, GRD e TIFF, e separados em folhas compatíveis com a articulação 1:250.000 do sistema cartográfico brasileiro, portanto, áreas de 1°x1.5° em latitude e longitude.

Equipamentos

Para manipulação de dados numéricos na geração de superfícies foram utilizadas as versões 6.0 e 8.0 de SURFER (GOLDEN SOFTWARE INC., 1995 e 2003). As operações para extração da amplitude foram organizadas na linguagem de programação interna do SIG Idrisi 2.0 – Idrisi Macro Language (IML) – (EASMAN, 1995). Operações de segmentação e classificação dos dados numéricos foram desenvolvidas em SPRING 4.3 (INPE, 2007) e ENVI, versão 4.5 (ITT, 2008). Testes de geoprocessamento e saídas gráficas foram gerados em Idrisi 32 (EASTMAN, 2000) e Global Mapper versão 9.0 (GLOBAL MAPPER LLC, 2007).

Procedimentos

A extração da amplitude topográfica envolveu basicamente três conjuntos de atividades, todas aplicadas sobre os MDE nas duas resoluções (90m e 30m): preparação dos dados da altitude, processamento dos MDE e pós-processamento dos modelos da amplitude nas formas numérica e qualitativa.

Em primeiro lugar, a partir dos MDE foi extraída uma área ligeiramente maior à quadrícula, a fim de contornar os erros decorrentes dos processamentos, os quais aparecem nas bordas das imagens na forma de ruído. Os dados SRTM3 foram submetidos a operações de pré-processamento para a reconstrução do MDE sem falhas na mesma resolução do dado de

entrada (90m), segundo metodologia de Valeriano (2004), e estruturados em arquivos de formato ASCII em colunas x , y , z .

O processamento consistiu em três etapas: deslocamentos direcionais dos valores da altitude, operações lógicas e aritméticas entre os planos de informação (PI) formados, e classificação das imagens resultantes. Os deslocamentos direcionais são uma técnica de geoprocessamento que permite a decomposição dos MDE em Modelos Digitais de Elevação Deslocados (MDE-D). Cada MDE-D é uma imagem formada pelos valores da altitude numa posição relativa específica a cada ponto, e confinados dentro de uma área de medição unitária ($a.m.u.$). Tomando-se como exemplo uma janela de 3x3, figura 2, o conjunto de oito modelos deste tipo, correspondentes às direções NW, N, NE, E, SE, S, SW e W, abrange as elevações de toda a vizinhança do ponto sob análise.

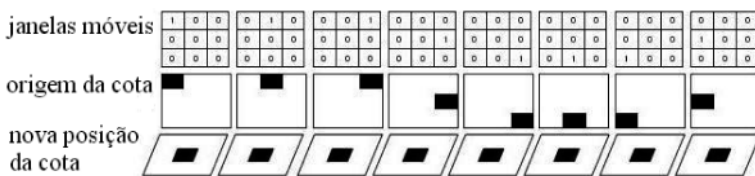


Figura 2 - Deslocamentos direcionais pela operação de janelas móveis 3x3

Os MDE-D foram gerados por SIG, a partir dos MDE originais, pelo deslocamento do valor da altitude de cada direção cardinal para o pixel central de uma janela móvel quadrada ($i=j$), de dimensão correspondente à $a.m.u.$ (figura 3-A). Foram testadas as dimensões 3x3, 5x5, 7x7, 9x9, 15x15, 21x21, 25x25 e 27x27 (pixels x pixels); também foram testadas uma janela em forma de cruz 15x15 e outra semicircular baseadas numa composição híbrida das dimensões 15x15 e 3x3, como se mostra na figura 3-B.

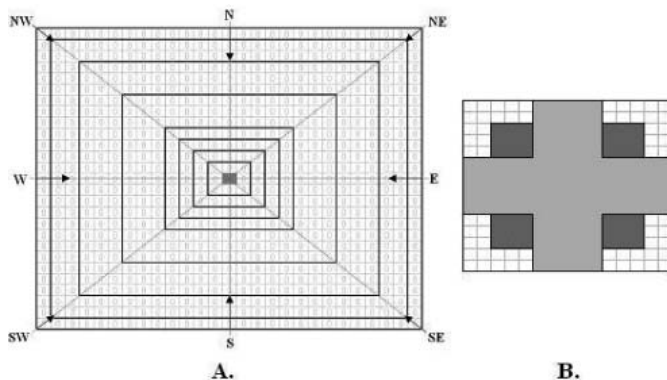


Figura 3 - Filtros direcionais. A. Filtros quadrados; B. Filtro semicircular composição híbrida

As operações lógicas consistiram na comparação dos MDE-D para extração dos valores mínimos e máximos da elevação, através de inequações baseadas na propriedade associativa de conjuntos, como se observa na figura 4. Os PI dos valores extremos da altitude assim obtidos constituem as superfícies de referência para o cálculo da amplitude

topográfica, a qual envolve somente a diferença (subtração) entre essas duas superfícies. O resultado das operações lógicas e aritmética é um novo modelo numérico, por cada resolução do MDE de entrada, que representa a amplitude do terreno em cada ponto da área de estudo. Ao longo do texto será dada referência a este modelo com o termo *MDI*, abreviatura de *Modelo Digital da Amplitude* ou *Modelo Digital do Relevo Interno*.

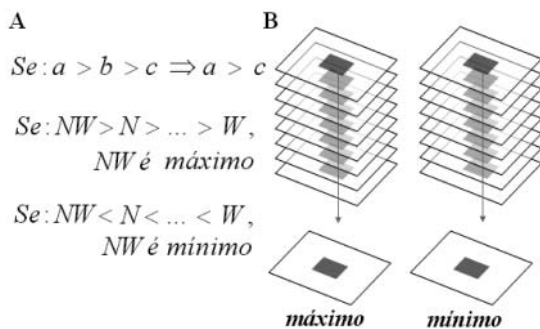


Figura 4 - Extração de valores extremos da altitude.
A. Inequações; B. Sobreposição

Após a extração dos MDI, as áreas de borda acrescentadas foram cortadas de forma a extrair exatamente o contorno da quadrícula em estudo. Sobre os MDI (90m e 30m) assim obtidos foi aplicado um filtro tipo *média* de tamanho 3x3, para suavização sem detrimento dos histogramas. Após a filtragem, com o propósito de compartimentar o terreno em unidades homogêneas qualitativas, foram testados três métodos de fatiamento dessas imagens: (i) classificação não supervisionada a partir de dados segmentados pela técnica de crescimento de regiões (classificador ISOSEG do SPRING); (ii) classificação não supervisionada (classificador ISODATA do ENVI); e (iii) limiarização (classificação por segmentação do histograma). Em seguida foram aplicados filtros tipo moda de tamanho 7x7 sobre as imagens classificadas, e geradas paletas de cores tanto para os MDI numéricos como para os qualitativos. Os produtos obtidos a partir do TOPODATA puderam ser comparados com os produtos obtidos a partir do SRTM3 pela expansão por re-amostragem destes últimos num fator de 3; a aplicação deste recurso não afetou os dados nem a distribuição dos histogramas dos produtos originais.

Pela aplicação de técnicas de geoprocessamento foram obtidos, para todos os tipos de solo da área de estudo, tanto os valores numéricos quanto os qualitativos da amplitude. Por fim, amostras aleatórias representativas de cada tipo de dado foram extraídas para apoio da análise e da interpretação das relações solo-amplitude.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Avaliações da altitude topográfica

A altitude da quadrícula de São Carlos varia aproximadamente entre 495m e 1080m. Sua distribuição de frequências tem um comportamento tri-modal com picos nas cotas 624m, 708m e 903m, relacionadas a três níveis altimétricos distinguíveis na quadrícula (figura 5): (A) a Depressão Periférica, onde ocorrem as cotas mais baixas e vales profundos; (B)

Planalto Basáltico; e (C) o conjunto de serrotes, morros e serras que sobressaem no Planalto, onde ocorrem as cotas mais altas.

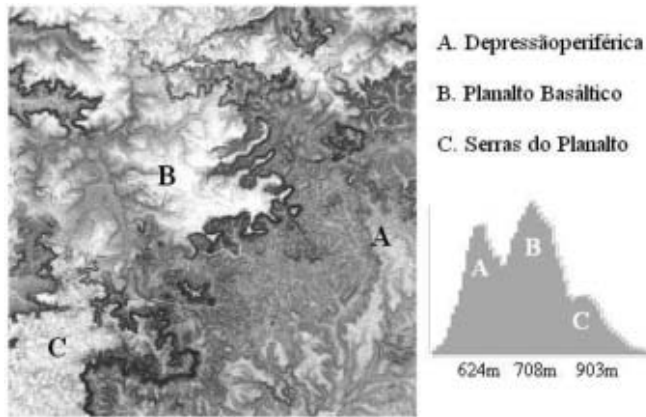


Figura 5 - Altitude quadrícula de São Carlos

Avaliações dos MDI numéricos

No processo de extração dos valores máximos e mínimos da altitude, os PI de saída conservaram a mesma resolução do MDE de entrada, mas todos os pixels que conformavam uma *a.m.u.* foram rotulados com o mesmo valor digital. Isto gerou nos PI uma aparente perda de resolução que na verdade é uma generalização das imagens. Assim, estes PI foram mais detalhados quando a *a.m.u.* aplicada para sua extração foi menor, isto é, quando a janela móvel foi pequena ou quando extraídos a partir do MDE de maior resolução. O efeito desta generalização se refletiu no MDI porque no seu cálculo foram considerados somente os valores extremos da altitude numa *a.m.u.*, e não a altitude em cada ponto, como se observa na figura 6.

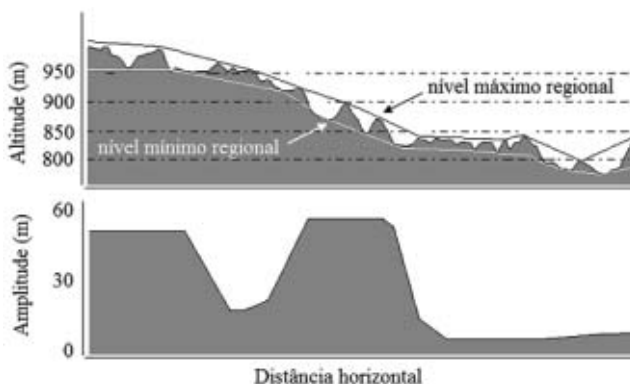


Figura 6 - Perfil hipotético da amplitude topográfica em relação à altitude.

Fonte: Adaptada de Peloso e Valeriano (2008).

Os MDI calculados pela aplicação de janelas de tamanhos entre 3x3 e 9x9 pixels sobre os dois MDE (90m e 30m) forneceram informação de vizinhança, semelhante ao cálculo de variáveis locais. Já os calculados a partir de janelas de tamanhos entre 15x15 e 27x27 pixels se mostraram grosseiros. De modo geral, na extração da amplitude topográfica, a aplicação de janelas quadradas (figura 3-A) não forneceu bons resultados dada a geração de feições ortogonais, principalmente quando aplicadas janelas grandes sobre o MDE 90m. Isto já tinha sido observado por Peloso e Valeriano (2008) quando calcularam a amplitude topográfica de uma região no litoral limítrofe entre Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Modelos MDI um pouco melhores foram obtidos pela aplicação de janelas em forma de cruz (figura 3-B) de dimensão 15x15 pixels sobre o MDE 30m. Mesmo assim, na aplicação destas janelas sobre o MDE 90m, os resultados ainda não se mostraram suficientemente satisfatórios. O melhor MDI foi obtido pela aplicação de janelas semicirculares, formadas por uma composição híbrida entre as dimensões 15x15 e 3x3, sobre o MDE 30m (figura 3-B); quando aplicadas estas mesmas janelas sobre o MDE 90m o MDI resultante aparece mais generalizado, como se observa na figura 7. Uma janela semicircular deste tipo corresponde a uma *a.m.u.* de 144.9 km² na resolução 30m e de 1304.1 km² na resolução 90m.

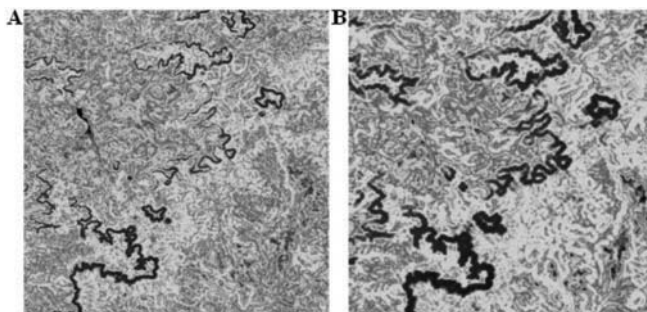


Figura 7 - Amplitude topográfica na forma numérica, extraída do MDE 30m (A) e 90m (B)

A distribuição de freqüências da amplitude topográfica apresentou comportamento assimétrico centrado em valores baixos sob ambas as resoluções, mas sua faixa de valores foi diferente, como se observa nos histogramas da figura 8. Isto se deve ao fato de que os valores máximos e mínimos da altitude, sobre os quais se baseia o cálculo da amplitude, variam em função do raio de busca, e este é função da *a.m.u.* utilizada no cálculo desses valores extremos.

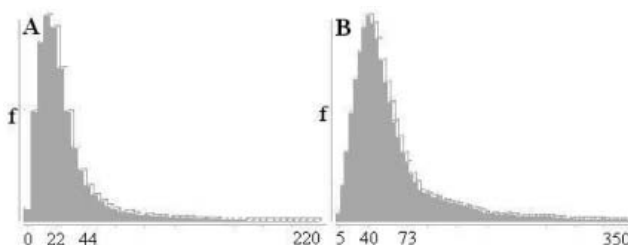


Figura 8 - Histogramas de freqüência dos modelos numéricos da amplitude MDI 30m (A) e 90m (B)

Quando calculada a partir do MDE 30m pela aplicação da janela semicircular de composição híbrida (figura 3-B), o MDI na área de estudo variou aproximadamente entre 0m e 220m, com máximas freqüências de amplitude na faixa de 10m e 40m e pico no intervalo entre 15m e 22m. Quando extraída a partir do MDE 90m pela mesma janela, o MDI variou entre aproximadamente 5m e 350m, com máximas freqüências de amplitude na faixa de 11m até 99m e pico no intervalo dos 20m até 80m. As regiões de amplitude máxima estão localizadas nas escarpas que formam os limiaries entre três estratos da altitude identificados na folha de São Carlos (ver figura 5). As menores amplitudes estão relacionadas principalmente com áreas de inundação tanto no Planalto Basáltico como na Depressão Periférica.

Avaliações dos MDI classificados

Pela apreciação do intervalo de valores dos MDI numéricos, a quantidade de classes ideal da amplitude se determinou entre cinco e oito. O rótulo (ou código) das classes foi estabelecido em escala ordinal crescente, de um até oito, correspondente à escala qualitativa entre relevo *muito raso* (classe de amplitude, $i_{cl} = 1$) e relevo *muito amplo* (classe de amplitude, $i_{cl} = 8$). Para ambos os modelos observou-se que o algoritmo ISODATA forneceu resultados mais favoráveis à separação de padrões da amplitude em cinco e seis classes. Já a separação destes padrões em sete e oito classes teve melhor desempenho pela aplicação do classificador ISOSEG. Na tabela 1 estão apresentados os limiaries de entrada na aplicação destes dois algoritmos.

Tabela 1 - Parâmetros de fatiamento da amplitude topográfica

Imagem numérica		Tipo de classificação	
		<i>Isoseg</i>	<i>Isodata</i>
i_n	30m	Obtiveram-se sete classes com: Similaridade = 10 Área = 15 Obtiveram-se oito classes com: Similaridade = 7 Área = 30	Obtiveram-se cinco classes a partir dos limiaries: Mínimo = 4 classes Máximo = 6 classes
	90m	Obtiveram-se sete classes com: Similaridade = 7 Área = 30 Obtiveram-se oito classes com: Similaridade = 7 Área = 10	Obtiveram-se seis classes a partir dos limiaries: Mínimo = 5 classes Máximo = 6 classes

O fatiamento do MDI-30m (figura 9) em cinco e, principalmente, seis classes se mostrou apropriado para o reconhecimento de padrões da amplitude nas áreas do primeiro e do segundo níveis altimétricos da altitude; já as áreas do terceiro nível altimétrico e as escarpas apresentaram-se saturadas e, conseqüentemente, seus padrões pouco distinguíveis. O fatiamento em sete e oito classes deste mesmo modelo definiu bem as escarpas sem apresentar saturação, mas, principalmente no fatiamento em sete classes, se perderam os detalhamentos das classes atingidas pelas duas primeiras classificações. O fatiamento em oito classes pareceu ter separado melhor os padrões da amplitude nesta escala sem satura-

ção das classes; foi este o modelo selecionado para avaliação da amplitude qualitativa em relação à altitude e aos solos de São Carlos.

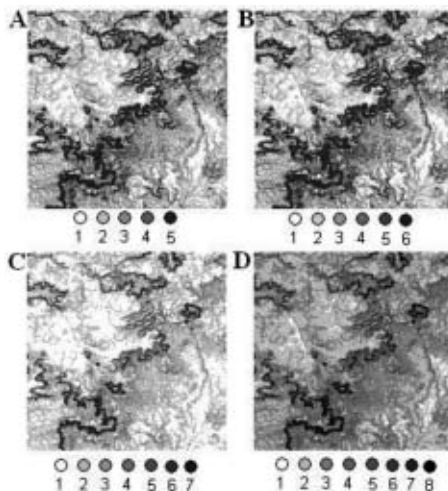


Figura 9 - Fatiamento do MDI-30m em cinco (A), seis (B), sete (C) e oito (D) classes

O fatiamento do MDI-90m (figura 10) em cinco e seis classes também apresentou saturação nas escarpas, mas o detalhamento dos padrões da amplitude nas áreas planas não foi tão claro quanto no fatiamento do MDI-30. No entanto, os padrões mais abrangentes em termos da área foram bem separados. O fatiamento em sete e oito classes deste modelo também apresentou saturação nas escarpas, embora em menor percentagem. O fatiamento em sete classes pareceu ter separado melhor os padrões da amplitude nesta escala sem saturação das classes.

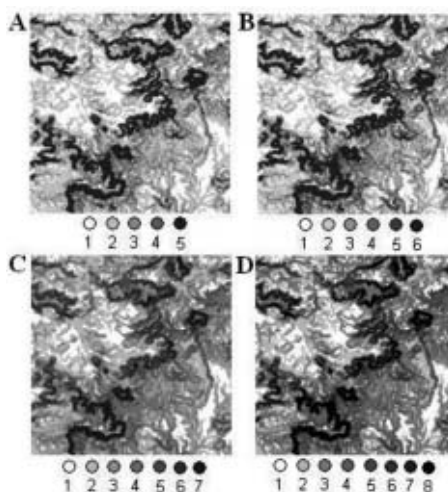


Figura 10 - Fatiamento do MDI-90m em cinco (A), seis (B), sete (C) e oito (D) classes

Avaliações da amplitude em relação à altitude

Na figura 11 estão representadas as relações entre o conceito de altitude e de amplitude. Como já tinha sido mencionado, em este esquema é possível notar que na avaliação da amplitude os detalhes da superfície topográfica são generalizados para um só valor, correspondente à diferença entre os valores extremos da altitude dentro de uma *a.m.u.*

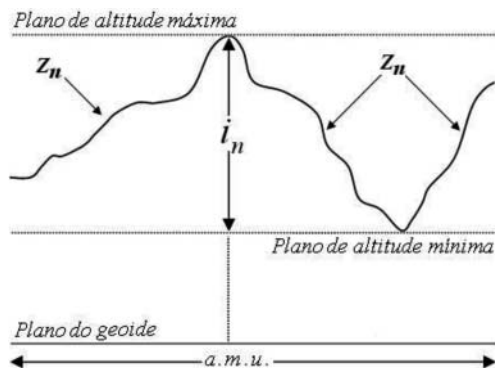


Figura 11 - Modelo conceitual da amplitude

Os coeficientes de correlação (r) e de determinação (r^2) entre os modelos MDE e MDI nas resoluções 30m e 90m se apresentam na Figura 12. Para ambas as resoluções o valor de r indicou baixo grau de relação entre os dois modelos. Por outro lado, os baixos percentuais do r^2 indicaram que a amplitude não pode ser explicada pela altitude e vice-versa.

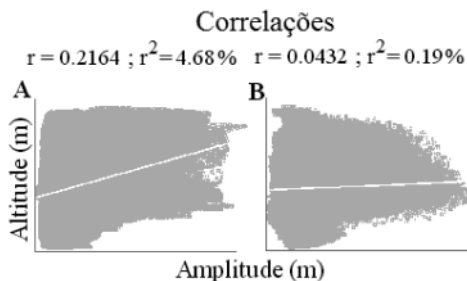


Figura 12 - Correlações entre os MDE e MDI

Observou-se que a amplitude na Depressão Periférica varia entre *muito-rasa* (i_{cf} : 1) e *médio-ampla* (i_{cf} : entre 4 e 6), com predomínio dos valores médios, enquanto no Planalto Basáltico predomina a amplitude *médio-rasa* (i_{cf} : entre 2 e 3) na faixa entre *muito-rasa* e *média*. Predomina a classe *muito-ampla* (i_{cf} : 8) nas áreas escarpadas.

Relações percebidas entre os solos de São Carlos e a amplitude topográfica

Os valores populacionais qualitativos e quantitativos da amplitude dos solos de São Carlos, no nível categórico *ordens de solo*, se mostram na Tabela 2.

Tabela 2 - Relações entre os solos de São Carlos e a amplitude topográfica

Solo	ID	i_n		i_{cl}	
		μ (m)	σ (m)	Classe	ID
Latossolos	LR	35.82	28.57	Rasa e moderada	2 e 3
Podzólicos	PV	32.77	21.38	Moderada e média	3 e 4
Areias Quartzosas	AQ	28.82	18.24	Muito rasa	1
Litólicos	Li	72.31	49.09	Muito amplo	8
Hidromórficos	Hi	7.50	4.00	Muito rasa	1
Terra Roxa Estruturada	TE	69.32	35.88	Muito Amplo	8

As avaliações amostrais indicaram que, na área de estudo, a classe *muito-rasa* (i_{cl} : 1) diferencia aos solos Hidromórficos das outras ordens de solo, enquanto a classe *muito-ampla* (i_{cl} : 8) permite diferenciar aos solos Litólicos e à Terra Roxa Estruturada do resto. No nível de *subordens* não houve variações em relação a este resultado. Já no nível de *grandes grupos*, a amplitude indicou a separação dos solos em três conjuntos: o primeiro composto pelos Podzólicos da Unidade Olaria (PV-6) e pelos solos Orgânicos (Or), estes solos foram caracterizados pela amplitude *muito-rasa* e *rasa*. O segundo grupo foi composto pelos Latossolos Vermelho-Amarelo da Unidade Itororó (LV-6), Podzólicos da Unidade Santa Clara (PV-5), Litólicos do substrato basáltico (Li-3) e arenito Botucatu (Li-4) e Terra Roxa Estruturada da Unidade Itaguaçu (TE-2); estes solos se caracterizaram pela amplitude *muito-ampla*. O último grupo, caracterizado por não ter uma amplitude predominante, mas sim dispersa, foi formado pelas restantes unidades de mapeamento presentes na quadrícula.

CONCLUSÕES

Este estudo mostrou a viabilidade da modelagem e interpretação do relevo para aplicação em estudos do meio físico pelo geoprocessamento de Modelos Digitais de Elevação TOPODATA (30m) e SRTM (90m). A partir dos resultados pode-se ainda concluir que:

- O algoritmo desenvolvido neste trabalho, baseado na aplicação de janelas móveis semicirculares, composição híbrida 15x15 e 3x3, foi apropriado para a extração da amplitude topográfica na forma numérica a partir dos dados de altitude na resolução 30m e 90m;
- Os melhores resultados da classificação desses dados numéricos foram obtidos pela aplicação do algoritmo ISOSEG, o qual está baseado na segmentação de imagens por crescimento de regiões;
- A amplitude topográfica se mostrou independente da altitude; estas duas variáveis forneceram informações complementares da superfície na área de estudo; e
- Os solos da quadrícula São Carlos, na escala 1:100.000, puderam ser descritos e discriminados pelas características da amplitude topográfica inerentes a cada um: as classes *muito-rasa* e *muito-ampla* desta variável indicaram, cada uma a seu modo, a separação dentre dois e três conjuntos dos solos da quadrícula, nos três níveis categóricos estudados.

REFERÊNCIAS

- BRASIL, MINISTÉRIO DA AGRICULTURA. **Levantamento de reconhecimento dos Solos do Estado de São Paulo**: contribuição à carta de Solos do Brasil. São Paulo: Centro Nacional de Ensino e Pesquisas Agronômicas, Serviço Nacional de Pesquisas Agronômicas, Comissão de Solos, 1960. 634p.
- BURROUGH, P. A.; McDONNELL, R. A. **Principles of geographical information systems**. New York: Oxford University Press, 1998. 333p.
- CÂMERA, G.; SOUZA, R. C. M.; FREITAS, U. M.; GARRIDO, J.; MITSUO, F. I. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modeling. **Computers & Graphics**, v.20, n.3, p 395–403, 1996. Disponível em <http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/index.html>. Acesso em 26 novembro 2008.
- EASTMAN, J. R. **Idrisi for Windows: User´s guide**. Versão 2.00. Worcester: Clark University, 1995. 440p.
- EASTMAN, J. R. **Idrisi for Windows: User´s guide**. Versão 132.11 Worcester: Clark University, 2000.
- EVANS, I. S. General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics. In: CHORLEY, R. J. (Ed.). **Spatial analysis in geomorphology**. London: Harper & Row, Publishers, 1972. Part I, p.17-90.
- FARR, T. G.; Kobrick, M. Shuttle Radar Topography Mission produces a wealth of data. **American Geophysical Union EOS**. v. 81, n.4, p.583-585, 2000.
- GOLDEN SOFTWARE INC. **Surface Mapping System**. Versão 6.01. Golden: Golden Software, Inc. 1995.
- GOLDEN SOFTWARE INC. **Surface Mapping System**. Versão 8.04. Golden: Golden Software, Inc. 2003.
- GUERRA, A. T. **Dicionário geológico geomorfológico**. Rio de Janeiro: Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, 1993. 446p.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, IBGE. **Cartas topográficas de Itirapina e Rio Claro**: SF.23-Y-A-I-3, SF.23-Y-A-I-4, 1:50.000. São Paulo: IBGE, 1969.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, IBGE. **Cartas topográficas de São Carlos e Corumbataí**: SF.23-Y-A-I-1, SF.23-Y-A-I-2, 1:50.000. São Paulo: IBGE, 1971.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, IBGE. **Manual técnico de pedologia**. 2ª edição. Rio de Janeiro: IBGE, 2007. 320p.
- ITT INDUSTRIES. **ENVI**. Versão 4.5. ITT. Visual Information Solution, 2008.
- MARK, D. M. Geomorphometric parameters: a review and evaluation. **Geografiska Annaler**. Series A, Physical Geography, v. 57, n. 3-4, p.165-177, 1975.
- MEIJERINK, A. M. J. Data acquisition and data capture through terrain mapping units. **ITC Journal**, v. 1988, n.1, p.23-44, 1988.
- MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I.M. **Climatologia**: noções básicas e climas do Brasil. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 206p.
- NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, IBGE, série recursos naturais e meio ambiente, n.4, 1979. 422p.
- PELOSO, B. D.; VALERIANO, M. M. Processamento digital de imagens SRTM para o mapeamento da amplitude altimétrica. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 7. (SINAGEO), 2008, Belo Horizonte (MG). **Anais...** Belo Horizonte: Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, 2008. 10p. CD-ROM.

PIKE, R. J. Geomorphometry diversity in quantitative surfase analysis. **Progress in Physical Geography**, v. 24, n. 1, p.1-20, 2000.

PRADO, H.; OLIVEIRA, J. B.; ALMEIDA, C. L. F. **Levantamento pedológico semi-detalhado do Estado de São Paulo**: quadrícula de São Carlos, SF.23-Y-A-I. Campinas: Instituto Agrônômico, IAC, 1981. 1. Mapa de solos. Escala 1: 100.000.

VALERIANO, M. M. **TOPODATA**: guia para utilização de dados geomorfométricos locais. São José dos Campos: INPE, 2008. 44p. (CNPq, processo n. 306021/2004-8, NV). Disponível em <http://www.dpi.inpe.br/topodata/documentos.php>>. Acesso em: 05 jan. 2009.

Recebido em janeiro de 2010

Aceito em maio de 2010