



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

**INPE-10550-RPQ/756**

**MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO COM DADOS SRTM  
DISPONÍVEIS PARA A AMÉRICA DO SUL**

Márcio de Morisson Valeriano

INPE  
São José dos Campos  
2004



*Aos filhos Rodrigo, Carlos e Gustavo,  
os geonautas do nosso quintal*



*Tal é a força do verdadeiro que, como o bem, propaga-se por si.  
(Abade Adso, em “O nome da Rosa”, de Umberto Eco)*



## **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem à estudante Polyanna da Conceição Bispo (UFSCAR), pela sua primorosa dedicação no estágio relacionado a este trabalho na fase de testes e análise operacional.

A Fábio Roque Moreira (PETROBRÁS) e Luciano Vieira Dutra (INPE), pela troca de dicas e valioso incentivo. A Eliana Maria Kalil Mello, Teresa Galotti Florenzano (INPE) e Nilson Pinto Teixeira (UFPA), pelo encorajamento indispensável e pelo aceno para colaborações futuras.

Aos colegas Benedito Domingues do Amaral e Jaime Nogueira Mendes Júnior (IB/UNESP), por uma amizade que se desdobra em vários planos e atravessa fronteiras imaginárias da pesquisa científica.

Aos Professores Paulo Milton Barbosa Landim (IGCE/UNESP), Aílton Luchiari e Lylian Coltrinari (FFLCH/USP), e ao colega Hélio do Prado (IAC), pelas contribuições involuntárias vindas de suas aulas e de nosso convívio.

Ao IAC, pelos ensinamentos técnicos e pelo direcionamento filosófico da atividade de pesquisa engajada à cadeia produtiva. Ao INPE, pelo acolhimento dessa consciência na programação de nossa agenda.

MINITAB<sup>TM</sup> é uma marca da Minitab Inc. nos Estados Unidos e outros países e foi usada neste trabalho com a permissão do fabricante.



## RESUMO

Este trabalho apresenta análises e testes com os dados SRTM que foram disponibilizados para a América do Sul, visando ao desenvolvimento metodológico para sua utilização. A apreciação dos dados originais mostrou a necessidade de operações de pré-processamento para uma adequada aplicação em estimativas e mapeamento de variáveis morfométricas. A krigagem dos dados mostrou-se uma alternativa interessante para a formação de Modelos Digitais de Elevação (MDE) mais fiéis à conformação do terreno, enquanto que a interpolação linear causou realce dos objetos presentes sobre a superfície. Para dimensionar aspectos operacionais dos métodos propostos de pré-processamento, os dados relativos aos Estados do Acre e São Paulo foram preparados sob resolução de 1" (ou ~30m) e avaliados em transectos, visualizações e análises morfométricas de microbacias conhecidas. Entre os principais resultados, ressalta-se que os dados apresentaram fortes restrições à sua utilização na sua forma original, porém o pré-processamento desenvolvido permite sua utilização em escalas relativamente detalhadas. Por fim, elaborou-se uma proposta para o desenvolvimento de um MDE com estes dados para todo o território nacional.



## **DIGITAL ELEVATION MODEL WITH AVAILABLE SRTM DATA FOR SOUTH AMERICA**

### **ABSTRACT**

This work presents tests with SRTM available data for South America, towards the development of methodologies for its use. Original data appreciation showed the need for pre-processing operations to properly map and estimate morphometric variables. Data kriging was found to be an interesting solution to construct Digital Elevation Models (DEM) with accurate relation to the land forms, while linear interpolation enhanced the presence of objects on land surface. In order to estimate the operational needs of the proposed methods, data regarded to the States of Acre and São Paulo were prepared under a 1" (or ~30m) resolution and evaluated through transects, visualizations and morphometric analyses in known watersheds. From the main results, it is remarked that the data showed strong limitations for its use in the original form, but can be used at relatively detailed scales after the developed pre-processing. Finally, the development of a DEM with this data set in national full coverage is structured and proposed.



## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
CAPÍTULO 1 - <u>INTRODUÇÃO</u> .....	15
<u>1.1 - Aplicações da informação topográfica</u> .....	15
<u>1.2 – Dados SRTM</u> .....	20
<u>1.3 – Necessidades técnicas dos MDE</u> .....	23
<u>1.4 – Elaboração de modelos com krigagem</u> .....	25
CAPÍTULO 2 - <u>MATERIAL E MÉTODOS</u> .....	27
<u>2.1 – Obtenção dos dados</u> .....	27
<u>2.2 – A coleção de dados SRTM para o território nacional</u> .....	30
<u>2.3 – Tratamento dos dados</u> .....	31
<u>2.4 – Aspectos operacionais</u> .....	34
<u>2.5 – Avaliação dos resultados</u> .....	35
CAPÍTULO 3 - <u>RESULTADOS E DISCUSSÃO</u> .....	37
<u>3.1 – Apreciação dos dados originais</u> .....	37
<u>3.2 – Análises geoestatísticas</u> .....	44
<u>3.3 – Modelos preparados</u> .....	49
<u>3.4 – Correlação com dados cartográficos</u> .....	53
<u>3.5 – Proposta metodológica</u> .....	58
<u>3.6 – Etapas futuras</u> .....	61
CAPÍTULO 4 - <u>CONCLUSÕES</u> .....	65
<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u> .....	67



## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

#### 1.1 Aplicações da informação topográfica

Dent & Young (1981) apresentaram uma descrição geral do trabalho de levantamento de sistemas terrestres, em que fundamentam e delimitam a importância direta do mapeamento de variáveis topográficas. Como em mapeamentos pedológicos, as atividades do levantamento de sistemas terrestres começam pela interpretação (via aerofotografias, imageamento orbital e análise do relevo) das formas de terreno e da vegetação, mapeadas independentemente, em que se procuram as feições características de cada sistema terrestre. Uma grande proporção de feições de ambos aspectos recaem sobre as formas de terreno, mais do que por razões práticas. É desejável que os sistemas terrestres estejam definidos o quanto for possível em termos de tipos de terreno, para que se atenda a uma base uniforme para o mapeamento. Em áreas planas, planícies costeiras e aluviais, a vegetação deve ser utilizada.

A identificação de formas de terreno é tradicionalmente feita quase sempre por julgamentos em termos qualitativos que são baseados nas descrições obtidas na fase de interpretação. Métodos paramétricos são também possíveis e de grande interesse, pois fornecem uma base mais objetiva e uniforme para a identificação de sistemas terrestres. Estes requerem a medição e o mapeamento de variáveis do relevo como altitude, declividade, curvaturas vertical e horizontal, orientação de vertentes etc., que são combinados para identificar *elementos de terreno*, que são por sua vez combinados em *padrões de terreno*. A adoção dos métodos tradicionais de levantamento é justificada pela demora e pelo custo dos métodos paramétricos. No entanto, alternativas como imageamento orbital e geoprocessamento podem reduzir substancialmente estes custos, senão com a mesma qualidade dos métodos tradicionais, ao menos com um grau aceitável de concordância com aqueles (Dent & Young, 1981).

Muitos estudos dão respaldo a esta alternativa com pesquisas voltadas à relação entre variáveis topográficas e atributos da paisagem de maneira sistêmica, como a

caracterização de solos, clima ou vegetação. Assumindo o desenvolvimento de solos como resposta à distribuição dos processos hidrológicos e erosivos e da temperatura do solo, Moore et al. (1993) relacionaram atributos pedológicos a variáveis topográficas, verificando que a situação topográfica explicou em parte expressiva a variação de importantes propriedades do solo. Brubaker et al. (1993) fizeram inferências semelhantes baseados na posição das observações sobre a superfície de vertentes. Briggs & Shishira (1985) observaram uma considerável redução na variabilidade dos atributos de solo dentro de cada unidade homogênea de relevo.

Tais efeitos edáficos, associados a efeitos climáticos, além da ação direta do relevo sobre a vegetação, têm dado suporte, por exemplo, ao estudo de efeitos topográficos para o mapeamento de tipos florestais (Florinsky & Kuryakova, 1996). Esses autores consideraram como ação direta da topografia o transporte e o acúmulo de material orgânico, incluindo sementes e outras estruturas de propagação e recomendam o uso de modelos digitais e mapas de variáveis topográficas para levantamento, mapeamento e compreensão dos aspectos dinâmicos da vegetação.

Os estudos aplicados à caracterização da paisagem com variáveis morfológicas têm sido favorecidos com o desenvolvimento de métodos automáticos de extração de variáveis topográficas. Muitos trabalhos abordam os aspectos ligados à erosão em estimativas diretas (Castro & Valério Filho, 1997; Ranieri et al., 1998; Molnár & Julien, 1998) e desenvolvimento de métodos automáticos de medição das variáveis (Desmet & Govers, 1996; Wladis, 1999; Iri et al., 2001; Remortel et al., 2001; Kinnel, 2001; Mizukoshi & Aniya, 2002; Valeriano & Garcia, 2000; Valeriano 2002a; Valeriano, 2003a; e Valeriano 2003b). Como exemplos de extração digital de informações da topografia, análises de redes fluviais (Wang & Yin, 1998; Turcotte et al., 2001; Valeriano & Moraes, 2001), partição de microbacias hidrográficas (Band, 1986) e a identificação de unidades de relevo (Miliaresis & Argialas, 1999; Miliaresis, 2001; Meijerink, 1988; Giles & Franklin, 1998) vêm sendo desenvolvidas em ambiente computacional, amenizando a demanda de trabalho manual e a subjetividade dessas atividades.

Todos os trabalhos citados buscam variáveis morfométricas, determinadas através de operações de vizinhança ou de conectividade (Valenzuela, 1991). Conseqüentemente, há uma estreita dependência destas variáveis em relação à exatidão relativa dos dados, ficando a exatidão absoluta com pouco ou nenhum efeito. Como exceção, ressaltam-se trabalhos que exploram a relação direta entre a temperatura e a altitude (Valeriano e Picini, 2000) e estudos ligados a cenários de inundação (Blomgren, 1999). Enquanto erros absolutos da altitude têm importância reduzida no primeiro caso ( $\sim 0,5^\circ/100\text{m}$ ), o segundo caso é definido nos mínimos desníveis.

Além da importância direta como informação, a identificação de tipos de relevo permite a particularização de diferentes métodos de tratamento, como propõem Valeriano & Garcia (2000), que recomendam uma estratificação do tratamento de dados dentro da escala de trabalho, em unidades geomorfológicas, microbacias ou vertentes. Em relação ao levantamento de solos, Briggs & Shishira (1985) sugerem que diferentes intensidades de amostragem devem ser aplicadas a cada atributo e a cada tipo de terreno. Esses estudos realçam a importância da estratificação topográfica como técnica de pré-amostragem, e também para melhorar a resolução espacial de mapeamentos de solo, visando ao manejo.

O mesmo pode ser indicado para a geração de mapas climáticos onde são reconhecidos estratos distintos de dinâmica atmosférica devido à compartimentação do relevo. A incorporação do efeito da topografia na krigagem dos dados pluviométricos tem se mostrado interessante para aumentar a fidelidade dos mapas (Goovaerts, 2000, Wotling et al., 2000). Além de explorar diretamente as relações da informação topográfica com o clima, Valeriano e Picini (2003) estratificaram os processos de preparação dos dados em grandes domínios geomorfológicos desde as análises preliminares, otimizando a capacidade de representação dos planos de informação gerados. Os dados de precipitação pluvial estão relacionados ao relevo por diversos mecanismos, decorrentes da ação do relevo aliado à dinâmica das massas de ar que condicionam a ocorrência do fenômeno pluvial. Os estratos geomorfológicos responderam diferentemente aos condicionantes do relevo, com padrões distintos de tendência geográfica e dinâmica sazonal.

Outra utilização indireta dos dados topográficos se fundamenta nos seus efeitos sobre a aquisição de dados remotos por sistemas sensores. Estes dados são fortemente modificados pelo relevo, sobretudo na faixa do visível e do infravermelho próximo (Justice et al., 1981). A redução do efeito topográfico sobre imagens multispectrais resulta numa redução dos erros de classificação espectral de imagens, tanto maior quanto mais acidentado for o terreno (Fahsi et al., 2000). Em imageamento por RADAR, a correção topográfica dos dados mostrou aumentar ligeiramente o desempenho dos processos de classificação, porém resultou em grande aumento da exatidão da estimativa de variáveis biofísicas (Franklin et al., 1995).

Um ponto chave para a viabilidade técnica dos modelos digitais de elevação (MDE) é sua preparação. Há trabalhos de pesquisa voltados exclusivamente à preparação e à avaliação de MDE por diversos métodos, a partir de dados igualmente diversos (Valeriano, 2002b; Valeriano et al., 2002; Reiss, 2002; Gao, 1995; Blomgren, 1999; Özdamar et al., 1999; Li, 1992, por exemplo). Dado um conjunto de pontos de elevação conhecida, a inserção da topografia em SIG ocorre através de da interpolação destes para um plano de informação. Este processo conta com a série de recursos diferentes, respondendo cada interpolador por uma série de vantagens e desvantagens. Muitos trabalhos foram feitos para verificar o desempenho destes interpoladores com base na comparação das cotas altimétricas entre as metodologias e com os dados conhecidos, como ainda é feito, por exemplo, para testar MDE obtidos por sensoriamento remoto, como da própria SRTM (Koch et al., 2002). Em virtude das pequenas diferenças de exatidão encontradas entre as elevações estimadas por um método ou outro, Kubik & Botman (1976) consideraram que outros critérios, como facilidade e velocidade computacional, deveriam nortear a escolha do método. Östman (1987), por sua vez, sugere que a qualidade dos MDE seja avaliada com base em atributos derivados, como declividade e curvatura, a exemplo do que fez Giles & Franklin (1996), que compararam resultados de declividade para testar MDE. Outros lidam com a extração de informações sob variadas condições de preparo do MDE (Thompson et al., 2001; Valeriano, 2003c), para o dimensionamento de demandas técnicas, aplicadas em pré-processamento, necessárias a uma utilização adequada.

Tais pontos de vista contemplam melhor o conceito de qualidade do MDE sob uma perspectiva funcional, pois estas variáveis derivadas estão mais próximas das aplicações da informação topográfica do que os próprios níveis altimétricos por si. Valeriano (2002b) lembra que os critérios aventados por Kubik e Botman (1976) são aceleradamente superados com os avanços tecnológicos na área de informática, e que a qualidade das variáveis de interesse deve ser priorizada. E sugere que diferentes planos topográficos possam ser armazenados, com diferentes metodologias de elaboração, para o atendimento a finalidades diferenciadas com demandas técnicas específicas.

Valeriano (2002b) avaliou modelos com base na visualização de transectos, histogramas da altitude e da declividade, além de um processo (ADD) que realça feições da hidrologia superficial, baseado em canais de drenagem, divisores de água e orientação das vertentes. Neste estudo, foi verificado que os modelos formados por krigagem, um interpolador inexato, expressaram melhor as formas do relevo em relação a outros interpoladores exatos (IQD e linear), em detrimento da amplitude do relevo, ligeiramente reduzida. Conseqüentemente, as aplicações estritamente dependentes diretamente dos níveis altimétricos dos divisores de água e dos canais de drenagem (como cenários de inundação, por exemplo) poderiam ser melhor supridas por modelos elaborados com interpolação linear ou outros, desde que preservem as cotas altimétricas originais. Alguns efeitos anômalos advindos dos processos de interpolação observados neste trabalho podem explicar a origem de algumas observações feitas sobre MDE disponibilizado pela USGS (United States Geological Survey), que haviam sido evidenciados através de histogramas por Guth (1999).

Um fator importante a favorecer a inclusão do relevo na identificação e na análise de sistemas terrestres advém de recentes coletas de dados topográficos por técnicas de sensoriamento remoto. A utilização de bases topográficas digitais obtidas por sensores orbitais representa uma alternativa de grande interesse para suprir a carência de mapeamentos, sobretudo na África, Oceania e América do Sul. Áreas cobertas com mapeamentos sistemáticos são também beneficiadas à medida que a preparação do material cartográfico para o processamento em SIG demandam mão-de-obra e tempo expressivos nos custos de um projeto de pesquisa.

## 1.2 Dados SRTM

As informações sobre o projeto SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*) relatadas a seguir foram retiradas do sítio do JPL (*Jet Propulsion Laboratory*, <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>) da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*). O projeto advém de cooperação entre a NASA e a NIMA (*National Imagery and Mapping Agency*), do DOD (Departamento de Defesa) dos Estados Unidos e das agências espaciais da Alemanha e da Itália.

A missão usou o mesmo instrumento utilizado em 1994 no programa *Spaceborne Imaging Radar-C/X-Band Synthetic Aperture Radar (SIR-C/X-SAR)*, a bordo do ônibus espacial *Endeavour*. Porém o arranjo foi projetado para coletar medidas tridimensionais da superfície terrestre através de interferometria. Para tanto, a nave foi munida de um mastro de 60m, em cuja extremidade foram instaladas antenas para bandas C e X, além de melhorados os dispositivos de controle e navegação (Figura 1.1).

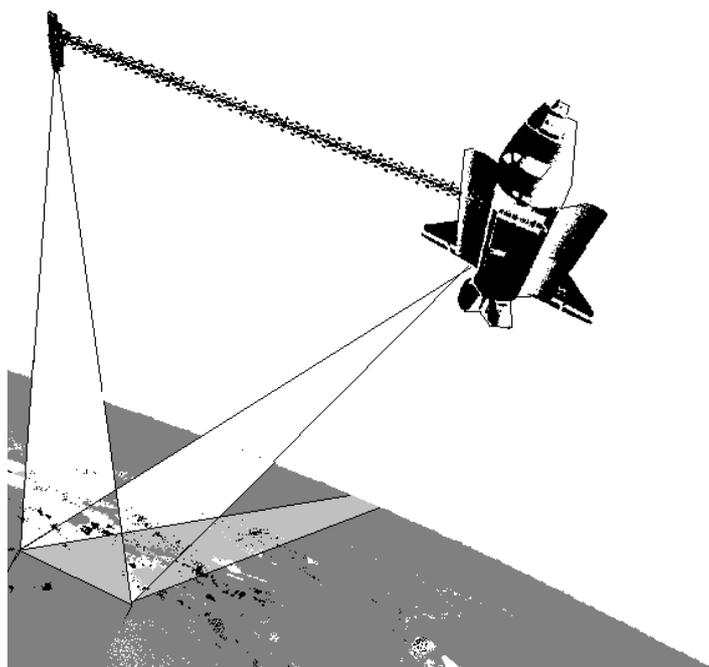


FIGURA 1.1 – Configuração das antenas a bordo do Endeavour para a missão SRTM. (Adaptado de USGS- <http://srtm.usgs.gov/data/obtainingdata.html>).

O sobrevôo da SRTM ocorreu no período de 11 a 22 de fevereiro de 2000, durante o qual foram percorridas 16 órbitas por dia, num total de 176 órbitas. O sobrevôo foi concluído com a coleta de 12TB de dados que vêm sendo processados para a formação de Modelos Digitais de Elevação (MDE). O processamento dos dados coletados visou à formação de um MDE mundial, elaborado continente por continente, iniciado com a América do Norte. À conclusão de cada continente, segue-se o envio dos dados ao NIMA, onde estes são editados, verificados e ajustados aos padrões norte-americanos de exatidão de mapas (*National Map Accuracy Standards*). Estes mapas são então devolvidos à NASA para distribuição pública através da USGS (*United States Geological Survey*).

A cobertura foi feita em 80% da área terrestre do planeta, entre latitudes 60° N e 56° S. Nesta área, foram realizadas de uma a quatro passagens, de acordo com a Figura 1.2. Um conjunto menor de dados foi coletado sobre água para calibração.

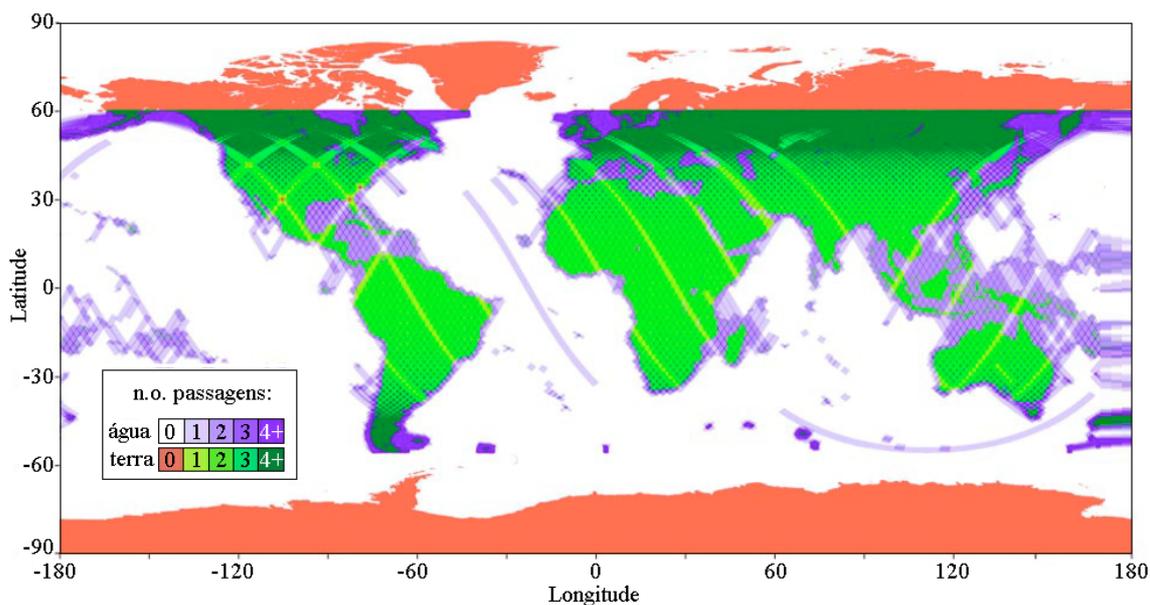


FIGURA 1.2 – Distribuição da cobertura e número de passagens da SRTM. (Adaptado de JPL - <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>).

Dos total de dados SRTM, os dados da banda C foram processados no JPL e os dados da banda X no Centro Aeroespacial da Alemanha (DLR). Estes são usados para criar MDE de resolução mais alta, porém sem cobertura global.

O projeto teve apoio de campo dado sobretudo por levantamentos geodésicos, no qual foi empregado um método denominado Sistema de Posicionamento Global Cinemático (*Kinematic Global Positioning System*), que favorece uma determinação veloz de linhas de posições dadas por um veículo em movimento. Ao todo, cerca de 70.000km de linhas (transectos) foram coletadas para apoio à missão. Além disso, equipes do JPL distribuíram refletores com coordenadas precisamente definidas, para geração de um conjunto de pontos de controle.

Em paralelo à montagem do MDE global, é feito o processamento de dados de locais específicos, selecionados pela equipe de pesquisadores do programa SRTM. Cada área destas cobre uma célula de 1 grau de latitude por 1 grau de longitude, cujos dados consistem em mapas, imagens e dados auxiliares inéditos. Estes são disponibilizados para a comunidade científica à medida que são completados. Em janeiro de 2002, a NASA iniciou a distribuição pública destes pequenos conjuntos de dados de locais dentro dos Estados Unidos. Enfim, foram gerados MDE sob resolução de 30m (a rigor, em coordenadas geográficas, como 1 arco segundo, ou 1'', ou ainda 0,000277°) para os Estados Unidos e planejados sob 90m (a rigor, 3'' ou 0,000833°) para o resto do mundo, embora estas questões ainda estejam em discussão pela NASA e pela NIMA. O datum e o elipsóide de referência são WGS84, com dados de  $z$  em metros inteiros.

Embora a NIMA aplicasse várias operações de pós-tratamento, que incluem remoção de picos e vórtices, nas informações que acompanham os dados o usuário é lembrado que suas características (inerentes a todo dado geo-espacial) devem condicionar seu desempenho ante aplicações específicas: uma característica dos dados SRTM que o torna inadequado para uma determinada aplicação pode ser inócua para outra. Informa-se ainda que nenhuma edição foi aplicada sobre os dados e que o conjunto em questão contém um grande número de vãos e outros pontos espúrios, como valores extremamente altos (picos) ou extremamente baixos (vórtices). Corpos d'água serão geralmente mal definidos, assim como as linhas de costa. Estas são as informações fornecidas pelo JPL sobre o programa SRTM.

Uma apreciação preliminar dos dados SRTM mostrou uma série de características indesejáveis, além daquelas informadas pelo fornecedor. Observou-se que as falhas negativas (vórtices) estão representadas por cotas negativas (-8388607m). Tais artefatos são facilmente reconhecíveis nas imagens, porém, devido ao elevado módulo deste valor, sua remoção requer operações cuidadosas para que não se contaminem as informações válidas. Técnicas expeditas para contornar este problema, tais como filtragens, não o eliminam, mas ampliam sua área de influência e modificam indesejavelmente os dados válidos. Ocasionalmente, foram observadas linhas cujas cotas se encontram abaixo das cotas de linhas vizinhas, formando uma feição artificial que se assemelha a um vale ou sulco retilíneo, com orientação E-W ou N-S.

Outra peculiaridade indesejável destes dados é sua sensibilidade a quaisquer objetos presentes sobre a superfície do terreno, tais como antenas, edificações e mesmo variações da cobertura vegetal. Embora tais objetos façam parte da superfície terrestre, sua inclusão no modelo atrapalham a percepção da superfície do terreno em si, como conviria à obtenção de informações de cunho topográfico. Filtragens causam ao usuário a impressão visual de minimizar estes efeitos, porém filtros (média, passa-baixa) não discriminam artefatos de feições reais, suavizando todo o relevo indistintamente. Estudos anteriores comprovam que suavizações desnecessárias do MDE prejudicam o desempenho de algoritmos de declividade, por exemplo (Valeriano, 2003c).

### **1.3 Necessidades técnicas dos MDE**

Observadas as especificações dos dados disponibilizados, pode-se tecer algumas considerações a respeito de seu potencial e suas limitações. Grande parte do território nacional é provido de mapeamento em escalas demasiadamente generalizadas para várias utilizações da informação topográfica. Por este aspecto, pode-se considerar o dado SRTM a melhor informação topográfica já disponibilizada para grande parte de nosso território. O resolução de 90m representa um avanço importante em relação à alternativa até então disponível, os dados RADARSAT-1, com resolução quilométrica.

No entanto, deve-se lembrar que são dados remotos e que, como tais, trazem consigo as limitações intrínsecas do sistema e estão sujeitos a uma série de fatores que alteram a

relação de veracidade para com a paisagem existente. Seu uso, portanto, requer o desenvolvimento de processos de pré-tratamento, para que atendam, ou que se aproximem, à demanda técnica da modelagem do relevo por SIG e sua integração com outras informações. Após o pré-tratamento, uma avaliação dos dados quanto ao seu potencial e limitações é oportuna antes da integração em modelos mais complexos, para que se possa estimar a precisão geral dos resultados finais de cada estudo.

A exatidão planimétrica é um dos aspectos necessários à sua utilização, e considerado um critério para avaliar produtos de sensoriamento remoto em relação a bases cartográficas. Como já observado para dados RADARSAT-1 (Valeriano et al., 2002a), os processos de georreferência e correção de dados remotos aplicados para MDE continentais podem ser insuficientes quando se deseja estudar localmente porções mais detalhadas da superfície terrestre. Portanto, pode-se recomendar que a georreferência dos MDE e de seus derivados em relação aos outros dados (ou vice-versa) seja feita caso a caso nas etapas iniciais de estudos temáticos do meio físico.

A utilização de modelos digitais de elevação recai principalmente sobre a obtenção de variáveis derivadas da altimetria (declividade, o exemplo mais freqüente). A obtenção destas variáveis é feita principalmente com operações de vizinhança (declividade, orientação e curvatura, por exemplo) e, em alguns casos, funções de conectividade (comprimento de rampa e área de captação, por exemplo), que requerem perceptibilidade das feições de interesse, altamente afetada pela resolução e precisão dos dados. Estudos com dados topográficos cartografados a partir de levantamentos terrestres mostraram a dependência da qualidade dos resultados em relação à resolução espacial do modelo. Por exemplo, sobre dados advindos de levantamentos na escala 1:10.000, a declividade obtida a partir de MDE com resoluções de 20m, 40m, 100m e 200m resultaram em coeficientes de determinação ( $R^2$ ) de 0,67, 0,62, 0,50 e 0,24, respectivamente, em relação aos resultados medidos manualmente (Valeriano, 2003c).

Dos aspectos da qualidade da informação topográfica, a exatidão altimétrica absoluta é a figura menos exigida em grande parte das aplicações dos MDE em estudos do relevo, com a importante exceção de estudos que envolvem inundação e outras questões

hidrológicas diretamente relacionadas ao nível altimétrico, conforme mencionado no item 1.1

#### **1.4 Elaboração de modelos com krigagem**

Uma forma interessante de preparo de MDE é a interpolação dos dados por krigagem. À parte das premissas teóricas da geoestatística na fundamentação desta técnica, MDE assim formados preservam características morfométricas do terreno representado (Valeriano 2002b; Castro & Viadana, 2002). A capacidade de lidar com as componentes da variabilidade especial fazem da krigagem uma forma interessante para manusear variações espacialmente aleatórias, como as que são causadas por erros, artefatos e, indistintamente, feições detalhadas. Ao passo que favorece o ajuste do MDE à conformação do terreno, a inclusão da aleatoriedade nas interpolações por krigagem causa ligeira perda de exatidão altimétrica nos talwegues e divisores de água com a redução da altura, ou amplitude, do relevo.

Por ser fundamentalmente estatística, a técnica da krigagem está ligada à população de dados sob estudo. Para conjuntos diferentes de dados, obtêm-se diferentes coeficientes geoestatísticos, que, usados no controle dos pesos aplicados nas interpolações, imprimem características ao MDE. Por exemplo, MDE interpolados com grande componente aleatória (efeito pepita) tendem a se apresentar mais suavizados. Desse modo, pode-se particularizar a interpolação dos dados em numerosas sub-áreas, em alternativa à adoção de um único modelo para toda uma área de interesse. Por outro lado, toda a metodologia de geoprocessamento posterior à formação do MDE torna-se sujeita às diferenças aplicadas, requerendo adaptações igualmente particularizadas. Valeriano et al. (2002b) estratificaram a preparação de modelos digitais de precipitação em áreas de características geomorfológicas distintas. Para contornar artefatos no limite entre as duas áreas, utilizaram uma faixa de transição entre ambas, num modelo médio em que a ponderação de modelos vizinhos foi distribuída gradualmente. Entretanto, ensaios não publicados mostraram que não foi possível contornar da mesma forma o problema na justaposição de MDE em folhas 1:50.000 individualmente analisadas e interpoladas. Ao contrário da distribuição de chuvas, o detalhamento da informação

topográfica e a natureza geométrica de sua utilização causam uma grande sensibilidade de seu desempenho ao modelo de variabilidade utilizado na sua interpolação. O forte efeito de mosaicagem decorrente destas tentativas tornou prática corrente a adoção de um único modelo de interpolação para toda a área de interesse de cada projeto de estudo do meio físico.

A necessidade de padronização dos processos de preparação, além dos aspectos descritos, convém principalmente pelos aspectos operacionais, quando se tem em mente a elaboração de um MDE do Brasil. Uma questão importante nesse contexto é a conciliação dessa necessidade com a qualidade advinda da particularização do modelo, que são aspectos igualmente importantes, porém paradoxais do ponto de vista metodológico. A questão requer, mais do que conjecturas teóricas feitas *a priori*, ciclos sucessivos de análises, testes, observação de resultados e redirecionamento dos métodos.

Este trabalho busca subsidiar a solução das questões expostas, através de análises e testes com os dados SRTM voltados à montagem de MDE estaduais para o Acre e São Paulo. Apresenta-se em seguida uma proposta metodológica para a utilização de dados SRTM na geração de MDE passíveis de extração de variáveis topográficas em SIG. Além da qualidade funcional do MDE, a proposta tem compromisso com a operacionalidade, buscando um nível de simplificação metodológica desejável para a sua preparação em escala nacional.

## CAPÍTULO 2

### MATERIAL E MÉTODOS

#### 2.1 Obtenção dos Dados

As imagens foram copiadas da rede mundial de computadores diretamente do endereço da USGS (*United States Geological Survey*), em que permanecem disponíveis sob a resolução de aproximadamente 90m. O acesso é feito pelo endereço <http://srtm.usgs.gov/data/obtainingdata.html>. Acessado este sítio, o interessado deve acionar a opção *View and Order Data Sets - International Viewer*, o que leva a uma série de procedimentos de identificação do usuário, ao qual não resta alternativas senão concordar que seus dados sejam transmitidos, na forma aberta (não codificados) à USGS. Ao fim destes procedimentos, apresenta-se um mapa, conforme Figura 2.1, com o qual o usuário interage para transmitir sua solicitação. Para a simples captura dos dados SRTM-90m, deve-se especificar o dado de interesse (Figura 2.1 – A) e, em seguida, a área de interesse (Figura 2.1 – B).

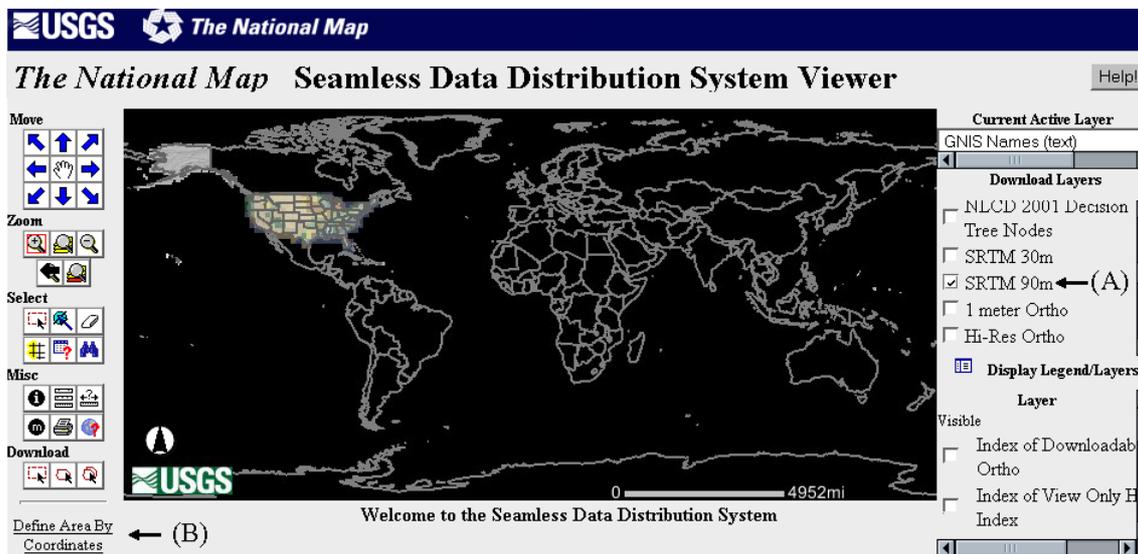


FIGURA 2.1 – Visualizador do sistema de distribuição de dados SRTM.

Uma nova janela é aberta (Figura 2.2), na qual deve-se inserir as coordenadas da área de interesse. Esta operação é trivial, exceto pelo detalhe que áreas compreendendo o equador (ou latitude 0) devem ser capturadas em duas partes, uma por hemisfério. Sempre que se desejar inserir latitude nula como uma das coordenadas do limite da área de interesse, deve-se evitar o valor absolutamente nulo (ou, na notação dos campos: 0° 0' 0'' S ou N). Deve-se preencher estes campos na forma 0° 0' 0.001'. Não há risco de se excluírem partes da área de interesse com este recurso, pois o cálculo da solicitação mostra-se insensível à esta diferença de um milésimo de segundo. Não há informações quanto a esses detalhes, mas o restante do processo é simplesmente paralisado se estes cuidados não forem observados, de acordo com numerosos testes de tentativa e erro.

FIGURA 2.2 – Interface para entrada de coordenadas da área de interesse.

Fornecidas as coordenadas e acionado o botão *select area*, o sistema calcula os dados da solicitação, após o quê estes são apresentados na página de resumo (Figura 2.3), para verificação e mudanças de especificação nos dados.

Product	Southwest (Bottom Left) Corner	Northeast (Top Right) Corner	Size (MB)	Link
SRTM 90m [Research Data] - ArcGrid format				
	11.000000 S, 70.500000 W	10.000000 S, 69.000000 W	9	<a href="#">Download</a>

FIGURA 2.3 – Página de resumo da solicitação de dados.

A página de resumo da solicitação contém a opção de se mudarem as especificações dos dados no botão *modify request* (Figura 2.3, C). A janela de opções (Figura 2.4) é apresentada quando este botão é acionado. O usuário tem opções em três caixas de diálogo: formato dos dados, formato do arquivo e formato dos metadados. Se nada for feito com as especificações, o formato dos dados de saída é ArcGrid. Depois de operadas as modificações, o usuário deve acionar o botão *Save Changes & Return to Summary*, o que leva a um novo cálculo da solicitação, com apresentação de uma nova página de resumo. Até certo tamanho de solicitação (algo em torno de 1º por 1º ou equivalente), o usuário pode optar pela transmissão dos dados via rede. Acima deste limite, o arquivo pode ser tanto partido em pedaços de 100MB, ou ainda impossibilitar a transmissão via rede, e resta, neste caso, a opção de envio do arquivo em CD, com os decorrentes custos de postagem e de prazo.

Request Options			
Requested Product(s):	Data Format:	ArchiveFormat:	MetadataFormat:
<input type="checkbox"/> MODIS NDVI - 6th Day	Not selected.		
<input type="checkbox"/> MODIS NDVI - 7th Day	Not selected.		
<input type="checkbox"/> SRTM 30m - Shuttle Radar Topography Mission	Not selected.		
<input checked="" type="checkbox"/> SRTM 90m - Shuttle Radar Topography Mission	TIFF	ZIP	HTML
<input type="checkbox"/> 1 meter resolution Orthoimagery	Not selected.		
<input type="checkbox"/> Hi-Res Orthoimagery - approx. 1 ft. Resolution	Not selected.		
<input type="checkbox"/> Bureau of Transportation Statistics (BTS) Roads	Not selected.		
Breakup of request into pieces:			
Maximum size per piece: 100 MB			
Display Options:			
WGS84 Coordinate Display: Decimal Degrees			
Media Options:			
Order this request on Media? No			
Cancel Changes & Return to Summary		Save Changes & Return to Summary	

FIGURA 2.4 – Opções de solicitação. Modifica-se o formato dos dados em D e o pedido é refeito em E.

Enfim, quando a página de resumo apresentar as especificações desejadas pelo usuário, a transmissão dos dados pode ser iniciada com o acionamento do comando *Download* (Figura 2.3, canto inferior direito). A partir deste comando, o usuário pode escolher o nome do arquivo a ser gravado e o diretório de armazenamento



Não havendo garantias quanto ao período de disponibilização destes dados, esta coleção foi imediatamente capturada, através de um trabalho diário de capturas individuais pela operação manual da interface da USGS, num total de pouco mais de 550 arquivos, armazenados entre os dias 5 de agosto a 5 de setembro de 2003. Para o presente estudo, foram avaliadas 21 folhas sobre o Estado do Acre e 28 sobre o Estado de São Paulo, num total de 49 folhas.

Optou-se pelo formato TIFF em função do fluxo de operações planejadas para incidir sobre os arquivos. Cada arquivo armazenado na forma compactada (ZIP), contendo uma série de arquivos auxiliares e de informações, ocupa um espaço de memória variável em torno de 2,2MB, num total de cerca de 1,17GB para todas as folhas que compuseram o território nacional. Cada imagem TIFF na forma expandida, passível de leitura por SIG, ocupa em torno de 8,5MB.

### 2.3 Tratamento dos dados

O tratamento dos dados consistiu na modificação do MDE SRTM original para um novo MDE, com características desejáveis. Entre as modificações pretendidas, listam-se: a resolução melhorada, de 1'' (~30m); a remoção das falhas; redução de artefatos; e distribuição da aleatoriedade. Os dados foram tratados desde a imagem TIFF original até o MDE segundo o fluxo abaixo (Figura 2.6).

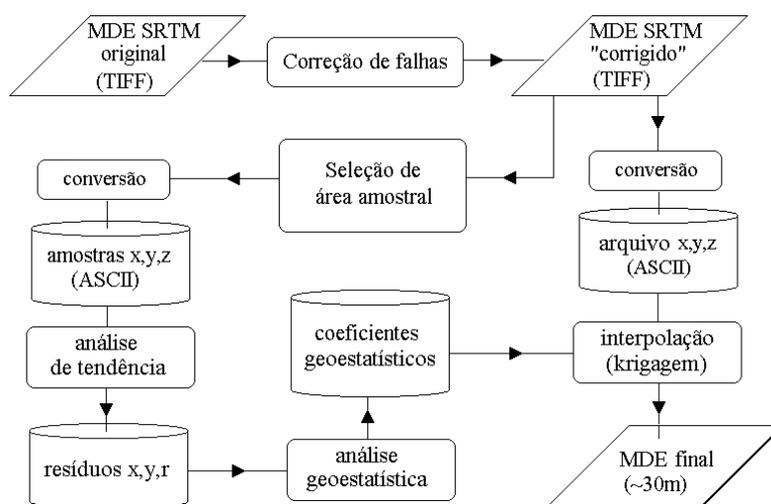


FIGURA 2.6 – Fluxo de tratamento dos dados SRTM para a elaboração do MDE.

A krigagem dos dados SRTM segue o mesmo fluxo daquele exposto em Valeriano (2002b), em que as cotas digitalizadas (com suas posições geográficas) constituíam amostras para análises geoestatísticas e posteriormente para a interpolação. Além da forma de inserção dos dados em SIG (digitalização de cartas topográficas no primeiro caso e sensoriamento remoto no caso atual), há a diferença fundamental de que as cotas TIFF perfazem uma grade regular. Portanto, o método foi adaptado a esta estrutura, trocando-se o processo de amostragem aleatória em SIG por uma simples seleção (e corte) de áreas amostrais para as análises geoestatísticas.

Os programas computacionais utilizados no tratamento foram *ENVI* (Research Systems Inc., 2002): correção de falhas, seleção de área amostral e exportação de dados ASCII; *MINITAB* (MINITAB Inc., 2000): análise de tendência e obtenção de resíduos; *VarioWin* (Pannatier, 1996): geoestatística; e *Surfer* (Golden Software, 1995): interpolação. Após a geração do novo MDE, utilizou-se ainda *Idrisi* (Eastman, 1995) para operações de geoprocessamento, aplicação de testes, algoritmos de análise do relevo e extração de resultados específicos. Em seguida, são descritos os procedimentos adotados em cada etapa de elaboração do MDE.

Em sessão do aplicativo *ENVI* (para cada folha):

- correção de falhas: carregada a imagem (*file/open image*), foi acionada a correção via menu *Topography/BadValues*, pela qual se estabeleceu desde -9999999999... até 0 como o intervalo de valores inválidos e a imagem corrigida armazenada na memória;

- exportação de arquivos ASCII: acionou-se a opção de menu *File/save file as/ ASCII*, definindo-se o formato em colunas x, y e z (botão *output style*, opção *XYZ format*). Ampliou-se o formato numérico das coordenadas (*XY field size*) de 10 para 14 caracteres, de modo que a largura da página não comportasse mais do que as desejáveis 3 colunas. De cada folha, uma amostra do mesmo modo, após selecionado um sub-setor 30x30, do canto superior esquerdo.

Ressalta-se que a seleção das áreas amostradas para a análise geoestatística foi feita de maneira sistemática, conforme exposto, sem levar em conta nenhuma informação prévia

sobre o tipo de relevo em que se encontra. Tal decisão foi tomada em função da operacionalidade, uma vez que esta amostra pode assim ser feita de modo independente de uma interpretação do relevo por especialistas, e por um grande conjunto de imagens. Outra vantagem desse esquema de amostragem sistemática é a possibilidade de sua inclusão em rotinas automatizadas.

Em sessão do aplicativo *MINITAB*:

- análise de tendência: para cada arquivo amostral (900 registros), foi feita a regressão de  $z$  em relação a  $x$  e  $y$ , determinando-se a tendência, na forma geral  $z=ax+by+C$ , para armazenamento e exportação dos resíduos ( $r=z-(ax+by+C)$ ) em arquivo no formato  $x,y,r$ , onde  $r$  é a coluna de resíduos. O processo foi feito de modo automático para todos os arquivos através do armazenamento dos comandos em rotina programável (macro).

Em sessão do aplicativo *VarioWin*:

- análise geoestatística: operação normal do aplicativo sobre arquivo de resíduos (módulo *Prevar*: geração de arquivo de comparação de pares; módulo *Vario2d*: criação de semivariograma; e módulo *Model*: ajuste de modelos teóricos). Foi feita uma edição dos semivariogramas, com padronização da escala dos eixos para favorecer análises visuais dos mesmos.

Em sessão do aplicativo *Surfer*:

- interpolações: os arquivos ASCII da totalidade de cotas de cada folha foram interpolados por krigagem, com os coeficientes dos modelos ajustados dos semivariogramas. O processo foi feito de modo automático para todos os arquivos através do armazenamento dos comandos em rotina programável (macro).

Para esta última etapa, foi escolhido um único modelo de interpolação para cada Estado, a partir de uma análise conjunta dos semivariogramas de cada um. O processo de decisão foi feito com base no número de ocorrências para cada tipo de modelo, levando-se em conta a similaridade dos coeficientes encontrados, complementado por testes de

aplicação e observação dos resultados. Os detalhes desta seleção constituem parte dos resultados procurados neste trabalho e se encontram descritos naquele capítulo.

Assim como a seleção dos modelos de interpolação, vários aspectos metodológicos estão pormenorizados junto aos resultados, uma vez que o desenvolvimento metodológico constitui por si o cerne deste trabalho. Desse modo, o entendimento da metodologia proposta fica mais claro com a observação de resultados, dos quais convergiram grande parte dos procedimentos.

#### **2.4 Aspectos operacionais**

Muitas decisões foram tomadas com o objetivo de se atingir um grau desejável de operacionalidade, com vistas à preparação de MDE de todo o conjunto de dados capturado para o território nacional. As vantagens operacionais atingidas minimizam a necessidade de intervenções manuais em provável detrimento da qualidade dos modelos, o que será verificado mediante testes e apreciação dos resultados. No entanto, a proposta de disponibilização dos modelos inclui a oferta dos dados originais para que o usuário possa aplicar a metodologia aqui desenvolvida em caráter localmente particularizado. Os aspectos operacionais descritos levam em conta ambas possibilidades.

De todos esses passos, a análise geoestatística pode ser considerada a mais exigente em tempo e habilidade, ou conhecimento, do operador. Os demais são processos automáticos (ou passíveis de automatização) e não requerem mais do que tempo computacional, após a especificação dos dados e dos parâmetros de entrada. A montagem de macros (como para as análises de tendência e para as interpolações) requer o conhecimento dos parâmetros de controle (especificação dos nomes de arquivos entrada, saída, coeficientes dos modelos de interpolação, dimensões dos arquivos, entre outros), e um breve treinamento para sua edição e consequente aplicação.

Em termos de equipamento computacional, os processos mostraram-se pouco exigentes em tempo de operação, com a exceção da exportação do arquivo de cotas (pouco mais de um minuto por folha) e, principalmente, a interpolação, que requer 8 horas por folha.

A análise de tendência, uma vez programada, forma os arquivos de resíduos de todo o conjunto avaliado (as 49 folhas) em um ou dois segundos. Em termos de espaço de memória, é importante observar o grande tamanho dos arquivos de cotas exportados pelo ENVI em ASCII (cerca de 93MB) e dos arquivos de grade interpolados pelo Surfer (76MB no formato binário e 153MB no formato ASCII).

## **2.5 Avaliação dos resultados**

Os resultados foram avaliados de maneira expedita, através de processos de visualização, análises gráficas e estatísticas, bem como observação dos resultados de análises morfométricas automatizadas.

Entre os processos de visualização, serão empregados o relevo sombreado (*Surfer*) e o processo ADD. O relevo sombreado apresentado pelo *Surfer* tem como característica a apresentação do relevo com exagero vertical tal que exista um equilíbrio constante entre iluminação e sombra em cada imagem exibida, independentemente de seu relevo de fato. Esta propriedade, em combinação com a possibilidade de se controlar a geometria de iluminação, torna essa forma de apresentação muito importante para avaliação visual de superfícies numéricas antes mesmo dos procedimentos de inserção destas em SIG.

A visualização ADD é um processo desenvolvido para aplicação em SIG (*Idrisi*), e consiste em sobrepor divisores de água e canais de drenagem à orientação de vertentes subdividida em semi-octantes. Complementa este processo uma paleta de cores específica, com 16 cores para as diferentes classes de orientação mais duas para a drenagem. As cores foram selecionadas a causar uma impressão tridimensional do relevo, com predominância de sombreado em vertentes orientadas para o Sul e iluminação para aquelas orientadas a Norte, entre outras características que favorecem visualização de aspectos da superfície do terreno (Valeriano, 2002b).

Foram feitos testes com áreas específicas do Estado de São Paulo, estudadas através da modelagem do relevo a partir de dados cartografados em escalas de 1:50.000 e 1:10.000. Embora não se tenha na área deste Estado todas as condições de relevo esperadas para o território nacional, o fato de dispor de mapeamentos detalhados e a

relativa diversidade de relevo fazem do Estado de São Paulo um laboratório conveniente para os testes que subsidiam o refinamento das metodologias de manipulação da informação topográfica. Estes testes foram feitos através de comparações diretas entre os MDE bem como entre os resultados de algoritmos desenvolvidos para extração de variáveis morfométricas. Nesse contexto, os resultados produzidos para o Estado do Acre representam um primeiro teste da expansão dos métodos assim estabelecidos para um ambiente de relevo senão desconhecido a princípio, na escala pretendida, ao menos sabidamente diferente, dada sua inserção na bacia amazônica.

## CAPÍTULO 3

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Apreciação dos dados originais

Nas Figuras 4.1, 4.2 e 4.3, apresentam-se áreas dos Estados de São Paulo e Acre em relevo sombreado (iluminado a 45° de elevação e 315° de azimute), elaborado a partir dos dados originais SRTM, em escalas sucessivamente detalhadas.

Conforme extensamente relatado em diversos trabalhos, o relevo paulista apresenta muitos compartimentos de características distintas. A folha escolhida para exemplificar o relevo paulista se apresenta bem movimentada, com grande diversificação de tipos de relevo. A altitude nesta folha varia entre 438m e 1632m, numa amplitude de 1194m.

Em decorrência do exagero vertical necessário para esta visualização, o relevo do Acre aparenta ser bem acidentado nestas figuras, embora relativamente uniforme. Porém, a altitude de toda a folha se distribui entre 167m e 487m, numa amplitude de apenas 320m. Removida a feição (serra) encontrada na porção centro-oeste, a altitude máxima encontrada foi de 392m, com amplitude de 225m. A folha exemplificada representa bem as demais áreas deste Estado, visto que o padrão observado repete-se nas demais 20 folhas do mesmo. Numa descrição sumária, este padrão caracteriza-se por alta densidade de drenagem, com interflúvios curtos e pequena amplitude altimétrica.

Na Figura 4.1, no formato de impressão deste documento, a escala absoluta de apresentação dos mapas é aproximadamente 1:1.111.111, pouco menor do que 1:1.000.000. Num relevo movimentado e diverso como o exemplo paulista, é possível distinguir tipos distintos de relevo, guardados o detalhamento e a possibilidade de interpretação apropriados à escala. No exemplo do Acre, pode-se distinguir apenas os principais cursos de drenagem, de modo geral. Nesta escala, não é possível perceber visualmente quaisquer problemas advindos da resolução espacial ou de outra natureza, apesar do conhecimento prévio de que esta resolução não permite bom desempenho de processamentos digitais que visem à obtenção de variáveis topográficas.

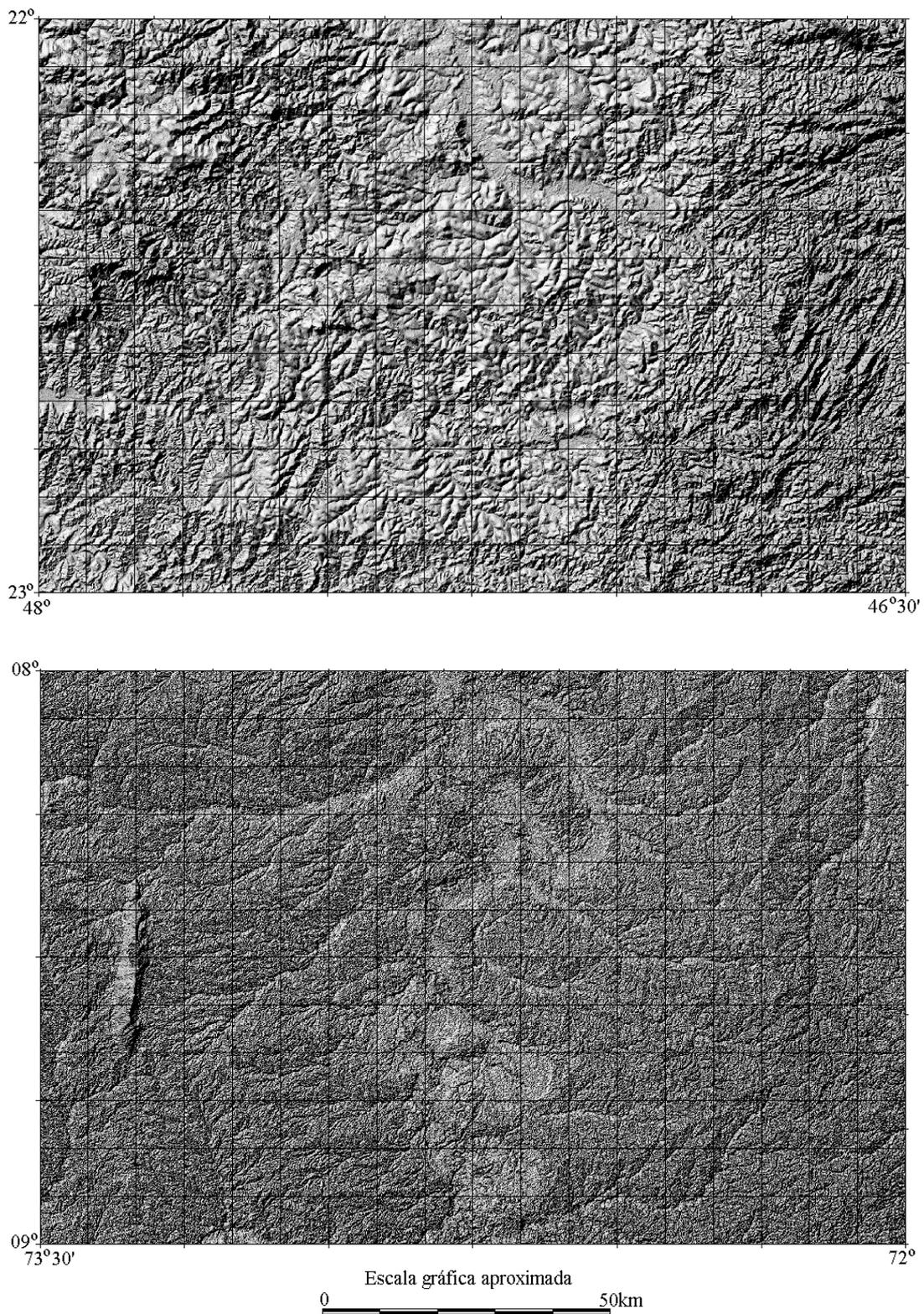


FIGURA 4.1 – Relevo sombreado (I). Áreas em São Paulo (sup.) e Acre (inf.). Escala absoluta aproximada 1:111.111.

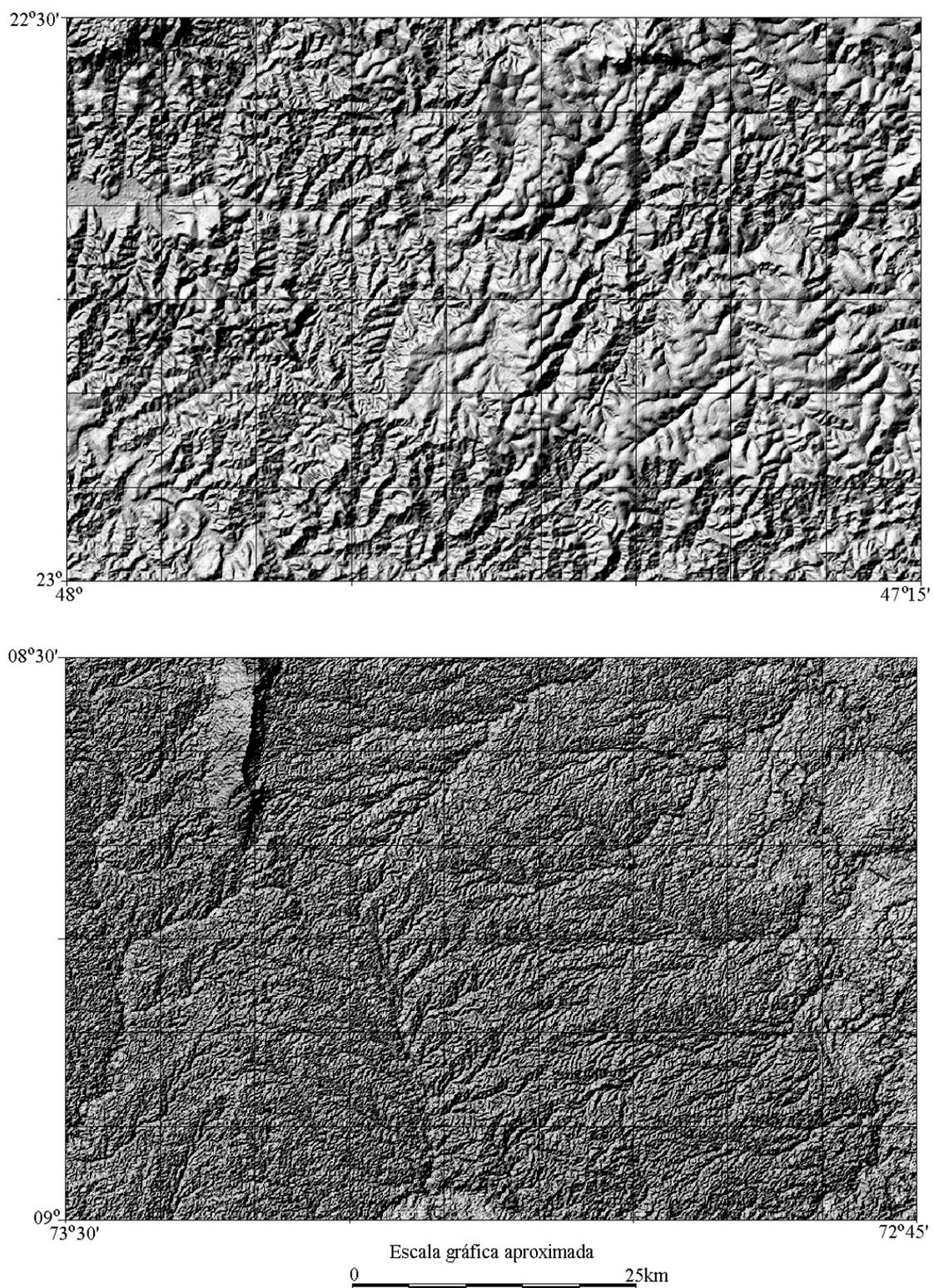


FIGURA 4.2 – Relevo sombreado (II). Áreas em São Paulo (sup.) e Acre (inf.). Escala absoluta aproximada 1:555.555.

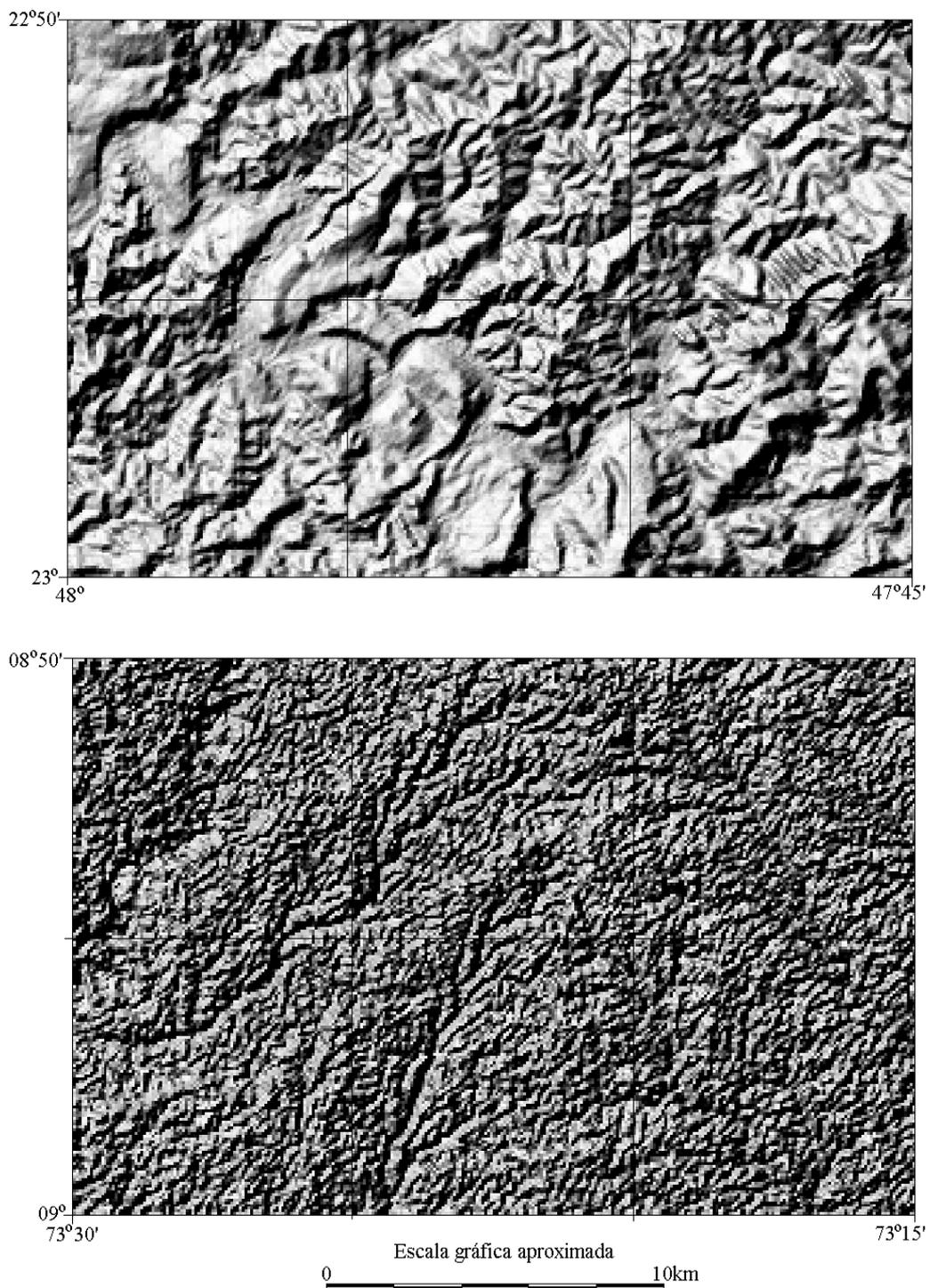


FIGURA 4.3 – Relevo sombreado (III). Áreas em São Paulo (sup.) e Acre (inf.). Escala absoluta aproximada 1:200.000.

Na Figura 4.2 (escala 1:555.555), a interpretação de feições de relevo é relativamente favorecida pelo detalhamento, embora na área do Acre muitas feições presentes no

modelo ainda se encontrem imperceptíveis, sobretudo a forma dos morros e vertentes. Na área paulista, é possível inferir estas feições sobre relevo mais suave, como no centro da imagem e, com algum esforço, a complexa estrutura da rede de drenagem nas porções restantes. Em ambas paisagens é possível avançar a percepção dos cursos de drenagem para rios de ordem inferior àqueles visíveis na representação anterior, da Figura 4.1.

Evidentemente, espera-se que as especificações dos dados permitam um detalhamento muito maior do que as escalas apresentadas nas Figuras 4.1 e 4.2. No entanto, ao ampliar o modelo até 1:200.000 (Figura 4.3), percebe-se que a resolução começa a fazer-se sensível, com perda da capacidade informativa em relevos de alta frequência de feições, como no caso de todo o relevo acreano e em parte do exemplo paulista. Nesses casos, os efeitos da fraca resolução acarretam uma limitação acima daquelas decorrentes da escala de observação.

Outra característica observada nos dados SRTM é sua sensibilidade a feições antrópicas de expressão topográfica, tais como cortes e aterros de estradas e edificações presentes em áreas urbanas (Figura 4.4), perceptíveis sob larga ampliação.

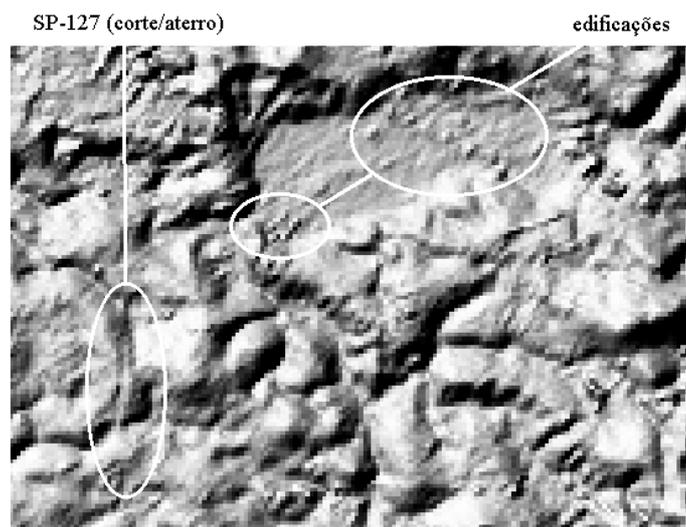


FIGURA 4.4 – Efeito de feições antrópicas nos dados SRTM. Cidade de Piracicaba, SP.

A expressão de feições antrópicas sobre os dados topográficos não se restringe às áreas urbanas. Em áreas de floresta, foi possível observar o desnível da superfície causado pelo desmatamento em diversos locais. Na Figura 4.5, em níveis de cinza proporcionais à altitude, apresentam-se alguns dos padrões decorrentes do desmatamento. Em geral, o contraste entre estas feições e suas margens correspondem a um desnível em torno de 30m, compatível com a altura da floresta. À esquerda se observa o encontro de dois padrões diferentes de desmatamento para fins agrícolas, em região da fronteira entre o Acre e Rondônia. À direita se observam clareiras circulares típicas de povoaamentos indígenas, observados no Acre. Com algum esforço, é possível identificar (detalhe ampliado) uma trilha a sudeste de um desses núcleos indígenas em direção ao rio.

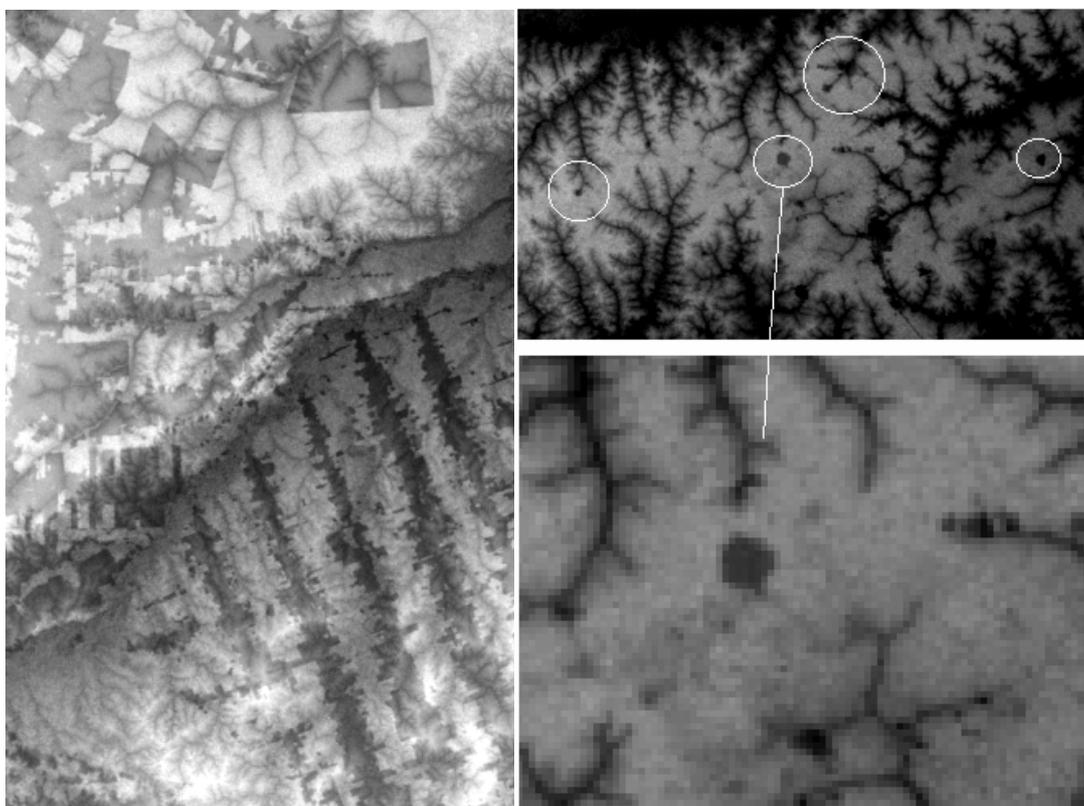


FIGURA 4.5 – Feições antrópicas em área de floresta: desmatamento (esq.) e povoaamentos indígenas (dir.)

As observações anteriores indicam que a superfície apresentada nos modelos de dados originais representa a topografia de topo dos dosséis florestais. No presente caso, ficou evidente a aplicação deste dado, na hipótese de haver uma cobertura periódica, para

monitorar desmatamento. Se, por um lado, tal característica desfavorece a modelagem do terreno em si, eventuais estudos voltados à estrutura da superfície de florestas podem eventualmente explorar estes dados para a análise de textura, conservadas as limitações devidas à sua resolução espacial e temporal. Constatado o efeito da altura de floresta, é razoável suspeitar que pequenos desníveis, abruptos e poligonais, que se destacam sobre o padrão de relevo, como o exemplo da Figura 4.6, se devam a variações do dossel. Sejam tais manchas devidas a efeitos pedobotânicos ou, caso independentes da vegetação, à própria topografia, este tipo de informação tem grande potencial para subsidiar o mapeamento de solos.

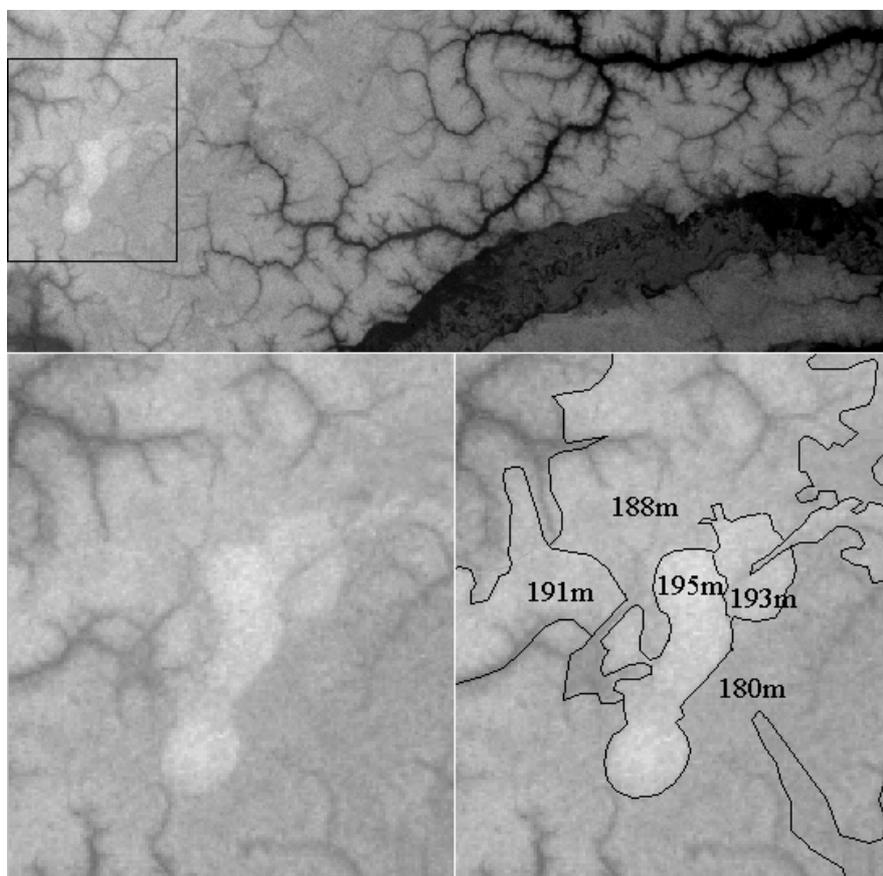


FIGURA 4.6 – Manchas de altura em área de floresta e relevo plano. Estado do Acre.

Na Figura 4.7 estão apresentados transectos e curvas de nível sobre o modelo dos dados originais. Observam-se tanto nas curvas como nos perfis uma série de artefatos, tais

como o padrão serrilhado nas isolinhas e arestas, assinaladas nos transectos, inesperados para o relevo da área, reconhecido como suave ondulado.

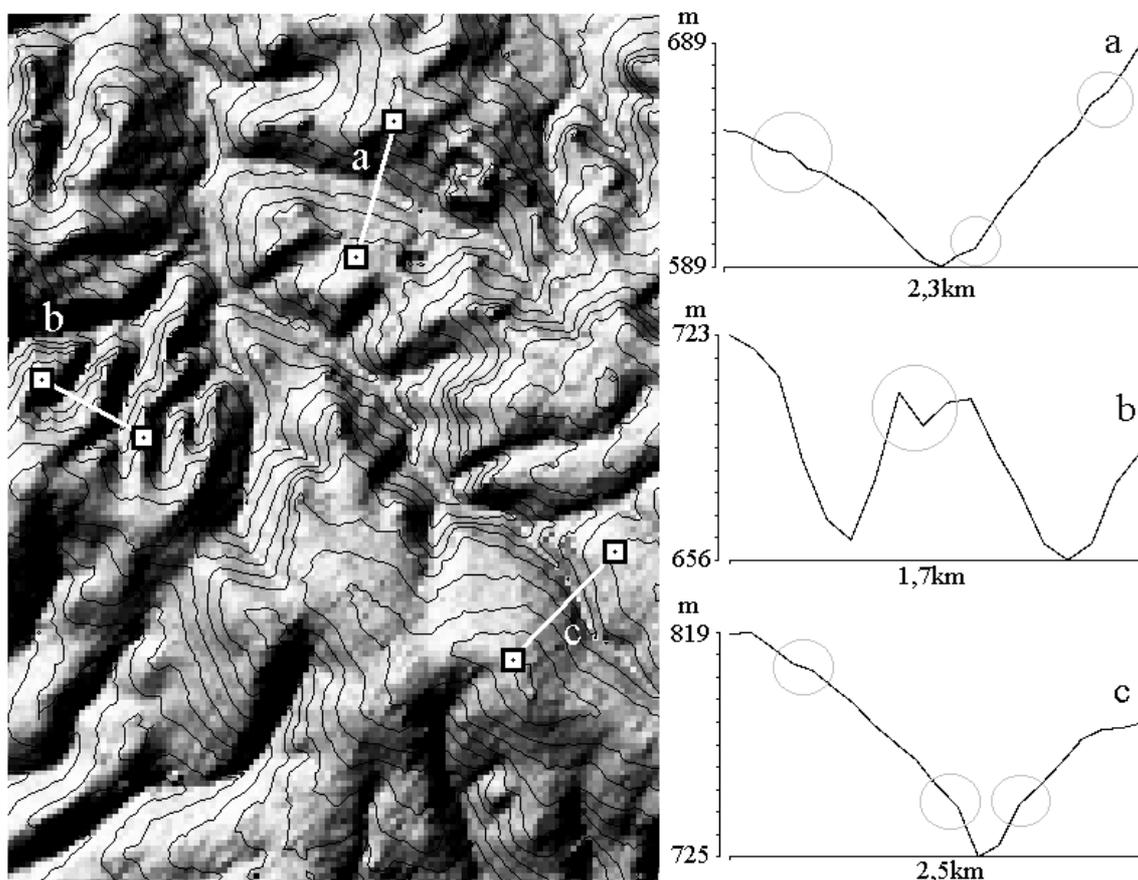


FIGURA 4.7 – Curvas de nível e perfis de transectos sobre MDE SRTM original. Região de Ribeirão Preto, SP, relevo suave ondulado.

### 3.2 Análises geostatísticas

Apresentam-se a seguir os resultados das análises geostatísticas aplicadas sobre os dados SRTM originais. Na Figura 4.8 apresentam-se os 28 semivariogramas obtidos sobre o Estado de São Paulo e na Figura 4.9 os 21 obtidos no Estado do Acre.

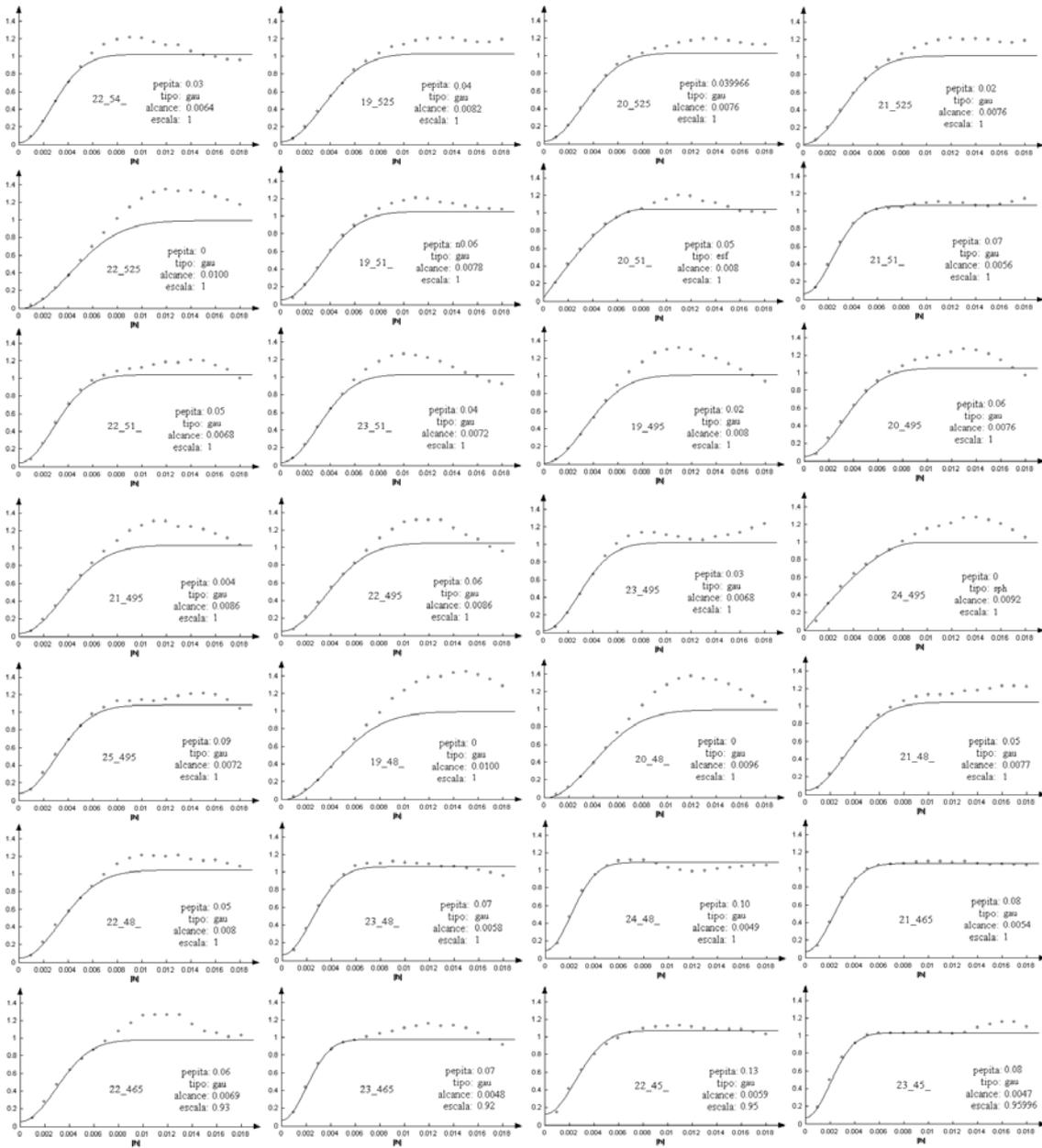


FIGURA 4.8 – Semivariogramas (semivariância padronizada) das 28 amostras do Estado de São Paulo.

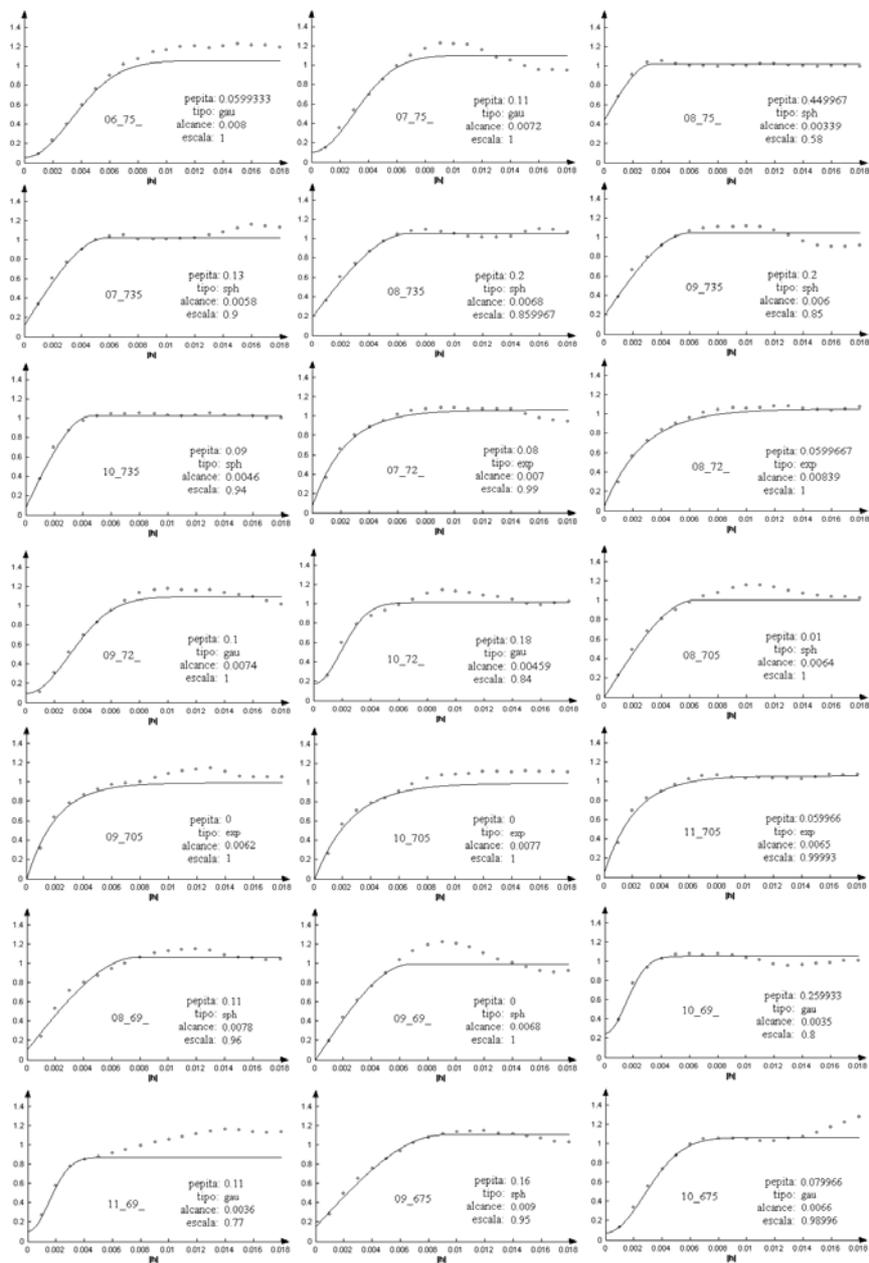


FIGURA 4.9 – Semivariogramas (semivariância padronizada) das 21 amostras do Estado do Acre.

Os modelos teóricos de semivariogramas ajustados à semivariância experimental foram escolhidos primordialmente em função do ajuste na região de menores distâncias ( $h$ ), que é onde geralmente se define o tipo de semivariograma. Observa-se que tal estratégia ocasionalmente resultou em semivariogramas teóricos mal ajustados na região de estabilização, ou patamar. Daqueles semivariogramas em que isto não ocorre, buscou-se

um modelo que representasse cada Estado através da seleção de um padrão baseado na moda. No caso do Estado de São Paulo, onde 26 dos semivariogramas resultaram gaussianos, a seleção do tipo de modelo foi simples. Entre os modelos gaussianos, consideraram-se comparáveis em qualidade de ajuste e nos coeficientes modelados aqueles referentes às folhas 21\_51\_, 23\_48\_, 24\_48\_, 21\_465, 22\_45\_ e 23\_45\_. Os resultados da folha 21\_465 foram escolhidos por apresentarem o modelo mais parecido com a média de coeficientes destes semivariogramas.

Observando os modelos, verifica-se que modelos semelhantes foram encontrados sobre relevos diferentes e vice-versa. Comparando-se a distribuição das famílias de semivariogramas semelhantes com a distribuição de compartimentos geomorfológicos do Estado de São Paulo (IBGE, 2004 e Ross & Moroz, 1997), não foi possível estabelecer qualquer relação entre os resultados geoestatísticos e tipos de relevo. Na Figura 4.10 apresenta-se um exemplo dessa verificação, numa análise expedita de sobreposição gráfica das amostras sobre a compartimentação do relevo paulista segundo o IBGE. Apesar da ausência de legenda, observa-se que os seis modelos gaussianos considerados semelhantes resultaram de seis classes distintas de relevo.

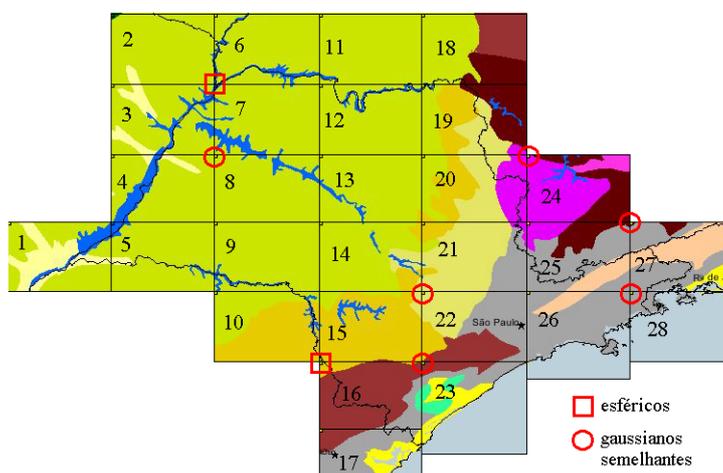


FIGURA 4.10 – Distribuição das amostras sobre compartimentos do relevo paulista. (Adaptado de [www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br)).

No caso Estado do Acre, nove modelos foram esféricos, sete foram gaussianos e cinco foram exponenciais. Embora o tipo de modelo mais encontrado tenha sido esférico, é

razoável supor que modelos gaussianos (o segundo tipo mais freqüente) possam ser adequados para a aplicação nos dados do Acre, ao menos em certas regiões. Sob apreciação visual dos semivariogramas do Acre (Figura 4.9), observam-se quatro modelos esféricos de ajuste superior aos demais (07\_735, 08\_735, 10\_735 e 09\_675). Dada a semelhança numérica entre estes, o modelo escolhido para fornecer os coeficientes para todos dados do estado do Acre foi um modelo esférico com coeficientes médios calculados entre estas 4 folhas. Entre os gaussianos, os melhores ajustes foram encontrados nas amostras das folhas 09\_72\_, 10\_72 e 10\_675. Para testes, o modelo encontrado para esta última folha foi também aplicado, em paralelo ao modelo esférico escolhido. Na Tabela 4.1, apresentam-se os modelos testados.

TABELA 4.1 – Especificação dos modelos testados

Nome	Origem	Tipo	Pepita	Alcance	Escala
SP1	Folha 21_465	gaussiano	0,08	0,0054	1,0
SP2	Folha 20_51_	esférico	0,05	0,008	1,0
AC1	Média dos 4 semelhantes	esférico	0,145	0,00655	0,91249
AC2	Folha 09_675	gaussiano	0,07997	0,0066	0,98997

As diferenças entre os modelos encontrados para os Estados de São Paulo e Acre representam uma importante dificuldade para automatizar a geração de MDE para a totalidade do território nacional. Se, por um lado, há ganhos em se particularizar a determinação geostatística do modelo de interpolação, por outro, modelos de características diferentes requerem que o desenvolvimento das análises dos MDE seja igualmente particularizado. Conforme observado ao longo de outros projetos de pesquisa, níveis diferentes de efeito pepita correspondem a graus diferenciados de suavização do modelo e a justaposição de modelos assim distintos mostra uma forte quebra no padrão apresentado. Além desse efeito, outros aspectos advindos de diferenças nos outros coeficientes da interpolação por krigagem devem causar heterogeneidade no desempenho de recursos digitais de análise do relevo. Alguns dos testes a seguir ilustram a dificuldade de uma padronização do processo de interpolação dos dados.

### 3.3 Modelos preparados

A Figura 4.11 apresenta a mudança de resolução dos dados SRTM sob dois métodos diferentes de interpolação, linear (TIN) e krigagem. A interpolação linear realçou feições de alta frequência, a exemplo das edificações da área urbana (sul), à medida em que se progrediu a resolução de 90m para 25m. Ao mesmo tempo, houve uma relativa melhora na definição das feições de relevo (norte), imperceptíveis nos dados originais.

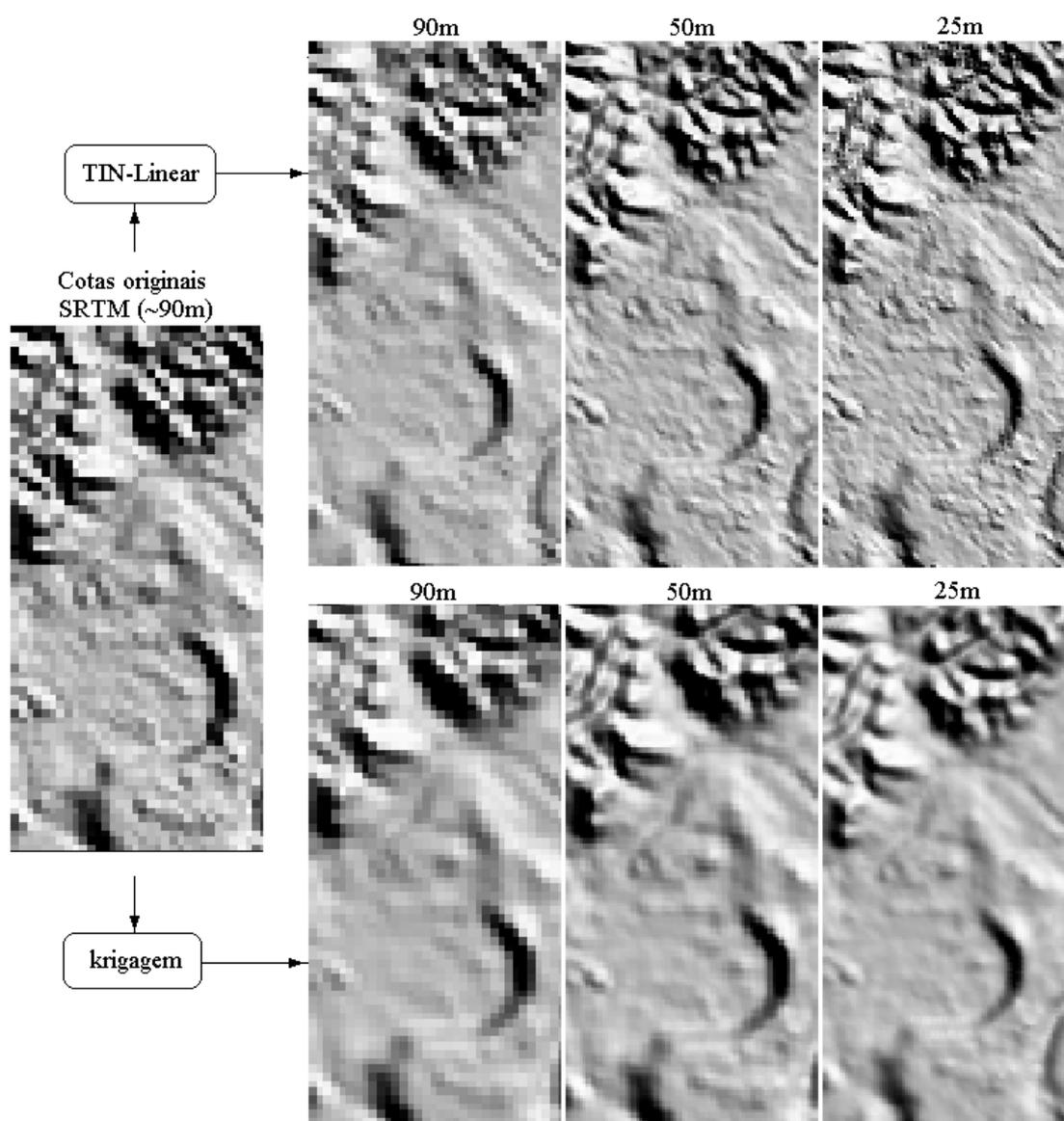


FIGURA 4.11 – Detalhe do relevo sombreado (elevação solar 45° a NE) dos modelos de dados SRTM originais e tratados. Área do “Banhado”, município de São José dos Campos, SP.

Por sua vez, a krigagem causou uma redução das feições de alta frequência, uniforme ao longo da progressão de 90m a 25m. Embora persista o efeito de objetos terrestres em proporção à sua altura e concentração, a suavização do relevo reduziu as mudanças abruptas de altitude, as quais resultam em picos locais quando aplicado o cálculo de declividade. Outra melhoria importante para a aplicação de processos digitais observada nos modelos krigados foi a definição da rede de drenagem (ao norte) em canais livres de artefatos.

Na Figura 4.12, testou-se o modelo gaussiano selecionado para o Estado de São Paulo (SP1), em comparação com seu correspondente esférico (SP2). O modelo esférico resultou em maior evidência de feições, das quais se sobressai uma rugosidade de vertentes suaves, conforme assinalado, em relação ao modelo gaussiano. Deve-se lembrar que há um forte exagero vertical nestas imagens, de modo que tais feições são muito pequenas em relação às variações absolutas dos modelos.

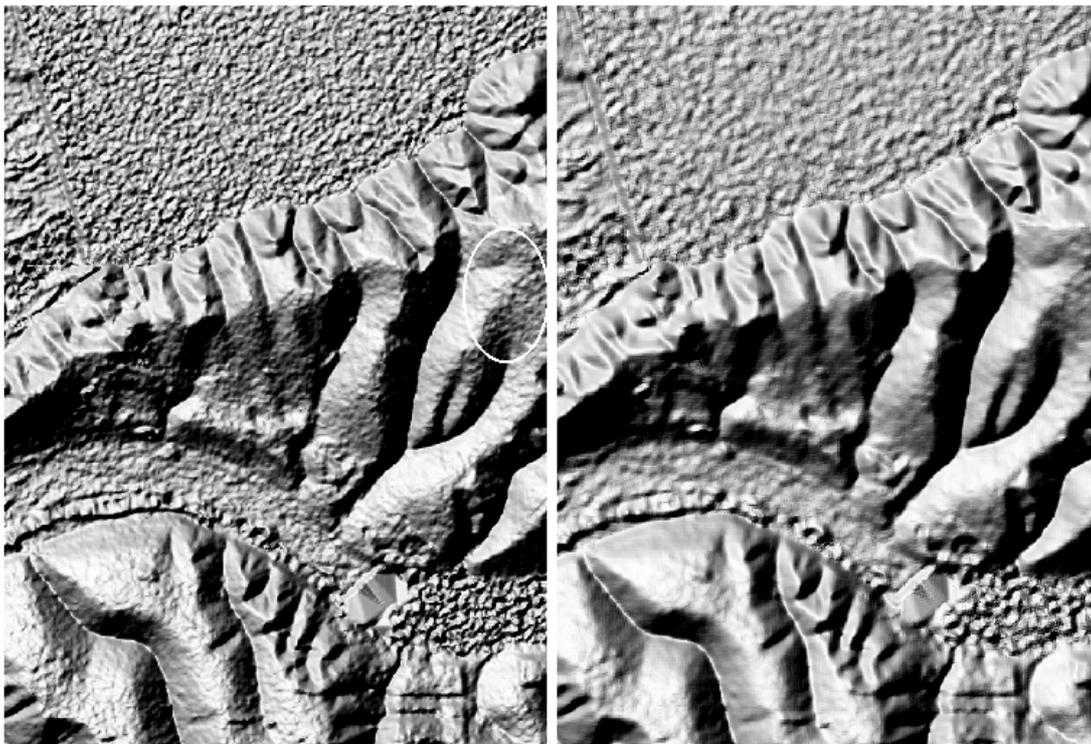


FIGURA 4.12 – Comparação entre modelos krigados para o Estado de São Paulo. Modelo esférico, SP2 (esq.) e modelo gaussiano, SP1 (dir.).

Devido ao exagero vertical, a Figura 4.13 mostra os corpos d'água como superfícies planas com alta rugosidade. Tal efeito corresponde a uma amplitude de 7m, entre 254m e 261m de altitude, nos dados originais, que foi reduzida para 4m através da krigagem com modelo gaussiano.

Entretanto, a capacidade do modelo esférico em reter detalhes mostrou-se uma vantagem em relevo caracterizado pelo detalhamento de suas feições, como no Estado do Acre (Figura 4.13). Contrapondo-se as observações sobre as Figuras 4.12 e 4.13, verifica-se que os modelos de semivariância obedecem a uma regionalização que, embora não apresentasse relação direta com o tipo de relevo retratado em escala estadual (Figura 4.10), não permite uma padronização na escala do território nacional sem perdas na percepção das feições de expressão local.

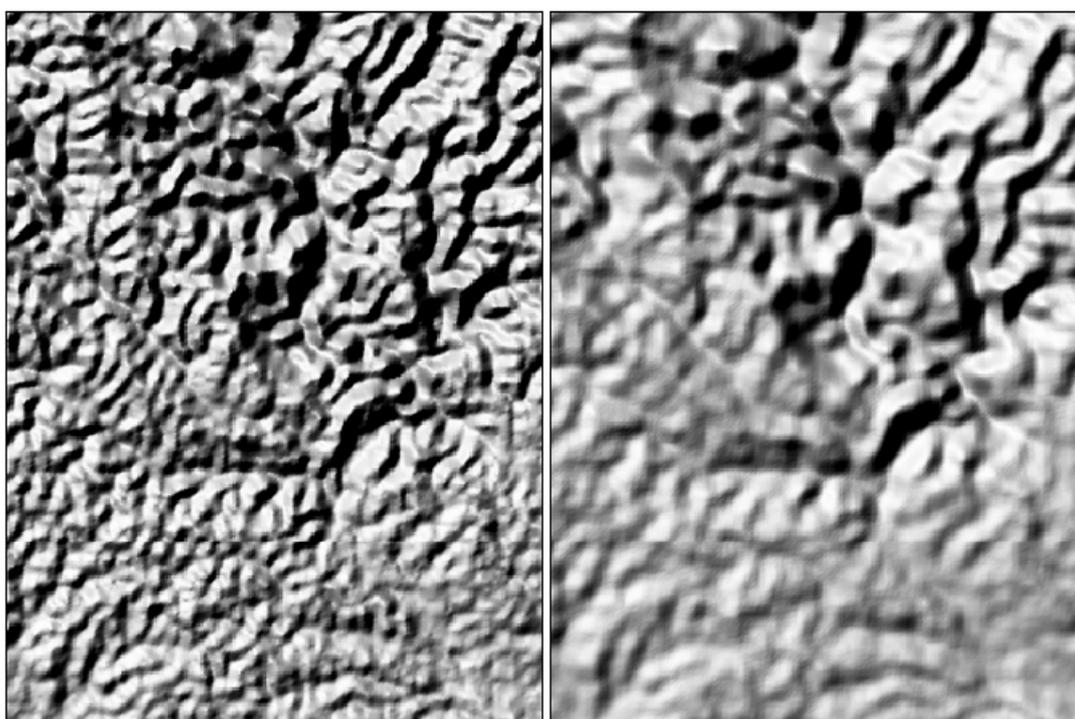


FIGURA 4.13 – Comparação entre modelos krigados para o Estado do Acre. Modelo esférico, AC1 (esq.) e modelo gaussiano, AC2 (dir.).

A Figura 4.14 apresenta em detalhe a comparação entre o MDE original e o krigado, em área de relevo suave ondulado. As curvas de nível foram geradas com equidistância

vertical de 20m. Observam-se nos dados originais alguns objetos, assinalados na superfície do modelo, que foram eliminados no processo de krigagem. No entanto, grandes objetos podem persistir, como ocorreu com o grande pico na porção central da área. Houve também uma importante melhoria para a definição de curvas de nível.

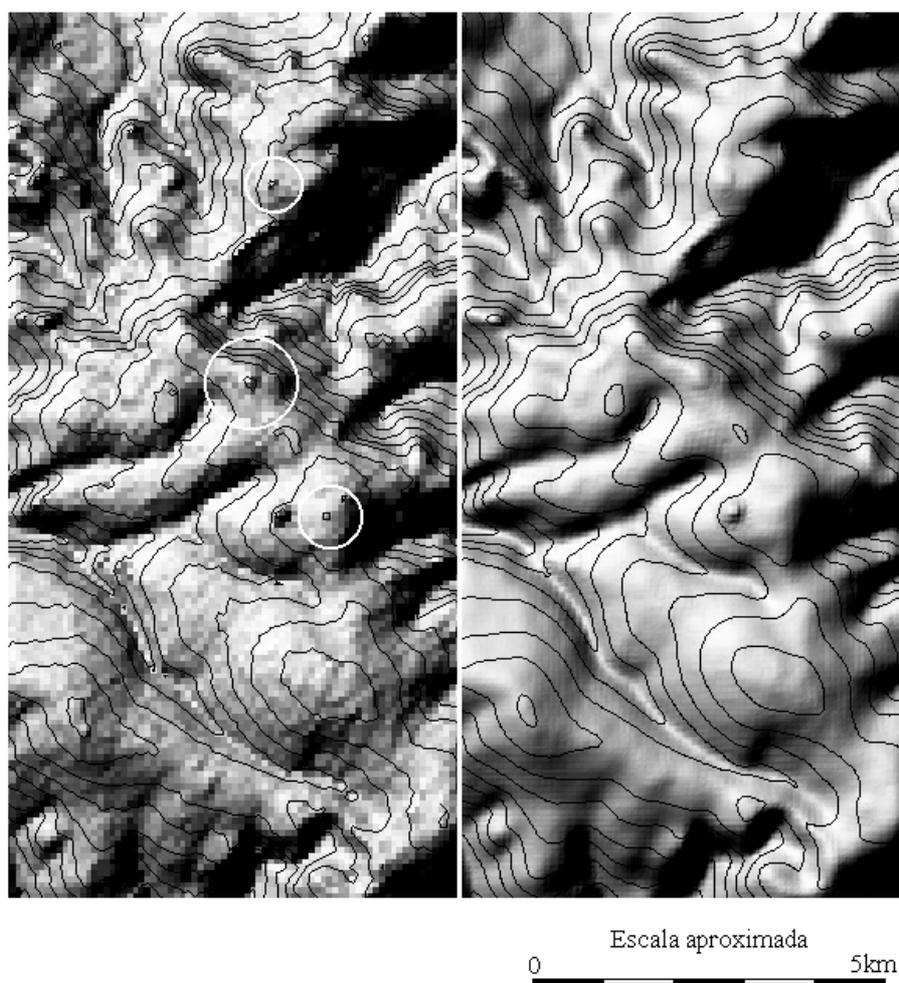


FIGURA 4.14 - Relevo sombreado de modelos de elevação gerados com dados SRTM originais (esq.) e tratados com krigagem (dir.) em relevo suave ondulado (Municípios de Ribeirão Preto e Cravinhos, SP).

No relevo predominante nos dados do Acre, onde a frequência de drenagem é maior e os desníveis altimétricos menores, o aumento de resolução pela metodologia proposta de krigagem mostrou-se mais ainda interessante (Figura 4.15). Nessas condições, a frequência das feições topográficas e a resolução espacial original guardam entre si uma proporção de 2:1 a 3:1, que impossibilita a percepção de relevo do modelo original. No

detalhe ampliado, em escala aproximada 1:50.000, enquanto o modelo original apresenta um padrão aleatório, o modelo tratado permite a interpretação de uma rede de drenagem e um relevo coerentes.

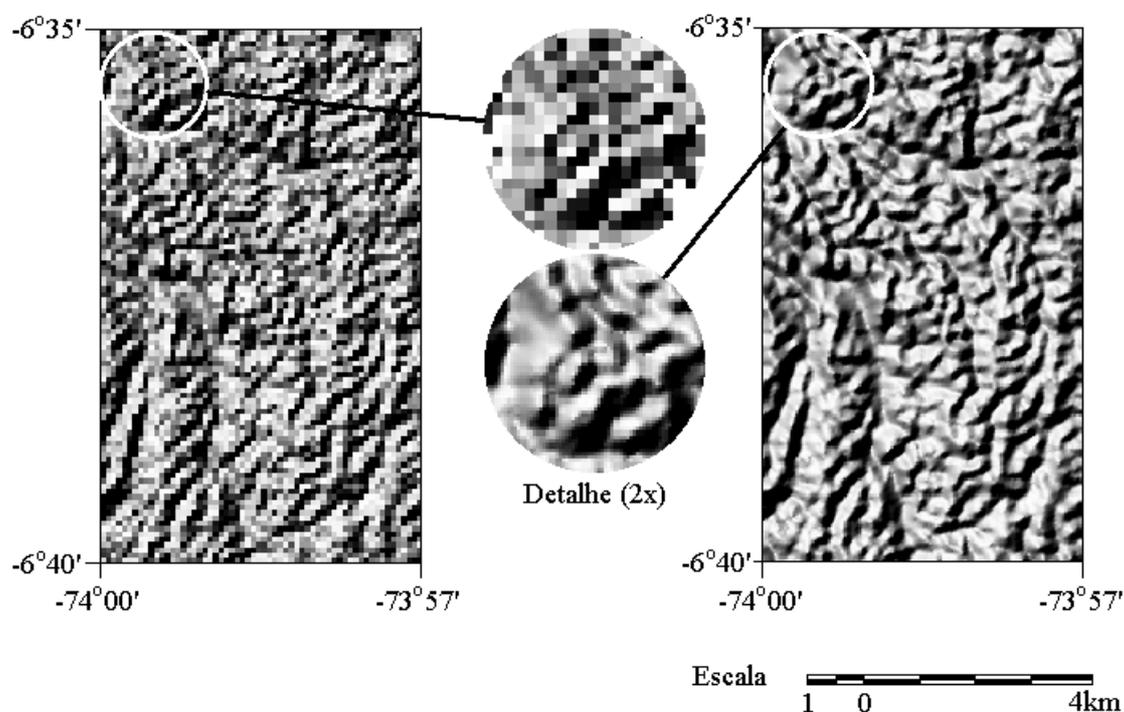
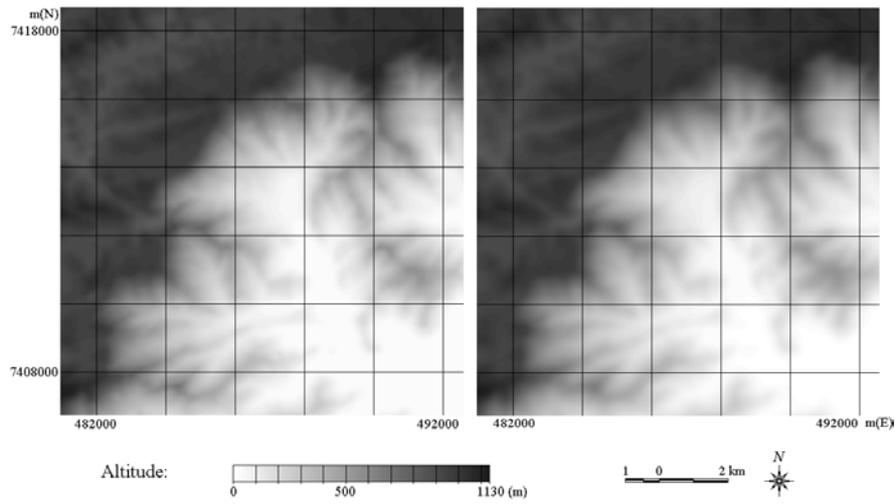


FIGURA 4.15 - Relevo sombreado de modelos de elevação gerados com dados SRTM originais (esq.) e tratados com krigagem (dir.) sobre alta densidade de drenagem (área da bacia amazônica localizada no Peru).

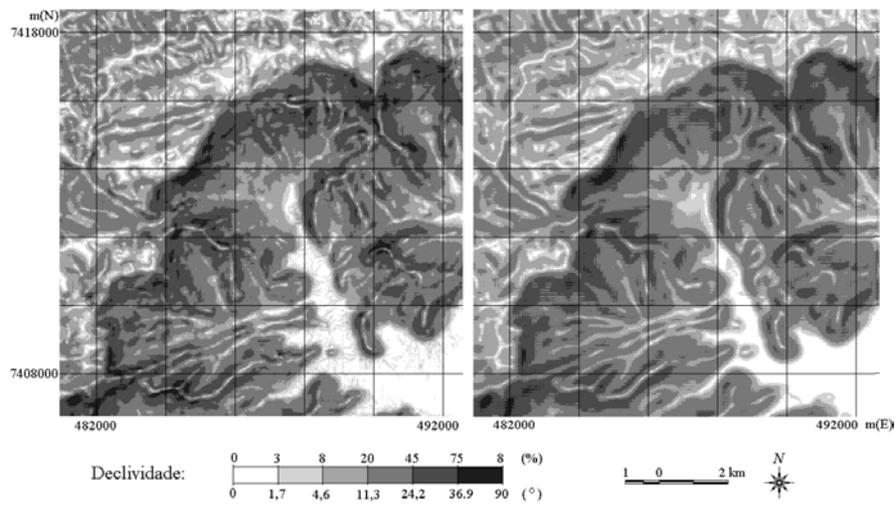
### 3.4 Correlação com dados cartográficos

Vistos os ganhos de qualidade visual dos modelos quando tratados com técnicas geoestatísticas, técnicas digitais de manipulação da informação topográfica foram testadas. Na Figura 4.16 são resultados da área de Ubatuba, elaborados a partir de dados SRTM e de dados digitalizados de cartas 1:50.000 (IGC). Os mapas de altimetria, declividade e orientação de vertentes foram obtidos com os mesmos processos e formas de apresentação, após a conversão de coordenadas do modelo SRTM de lat/long para UTM. Entre as simplificações adotadas neste teste, ressalta-se que não foram observadas as diferenças de *datum* vertical e horizontal entre as fontes de dados, além de ter sido necessário um pequeno deslocamento sobre o modelo SRTM após sua preparação, para a perfeita sobreposição das feições evidenciadas pelo processo ADD.

A.



B.



C.

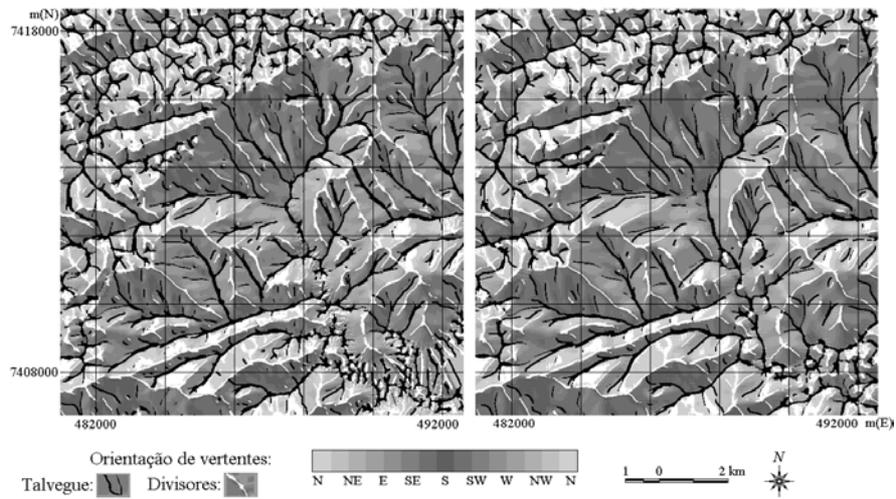


FIGURA 4.16 – Comparação entre dados do IGC 1:50.000 (esquerda) e dados SRTM, resolução de 20m. Área de Ubatuba, SP.

Analogamente, a Figura 4.17 apresenta as mesmas comparações na forma de diagramas de dispersão.

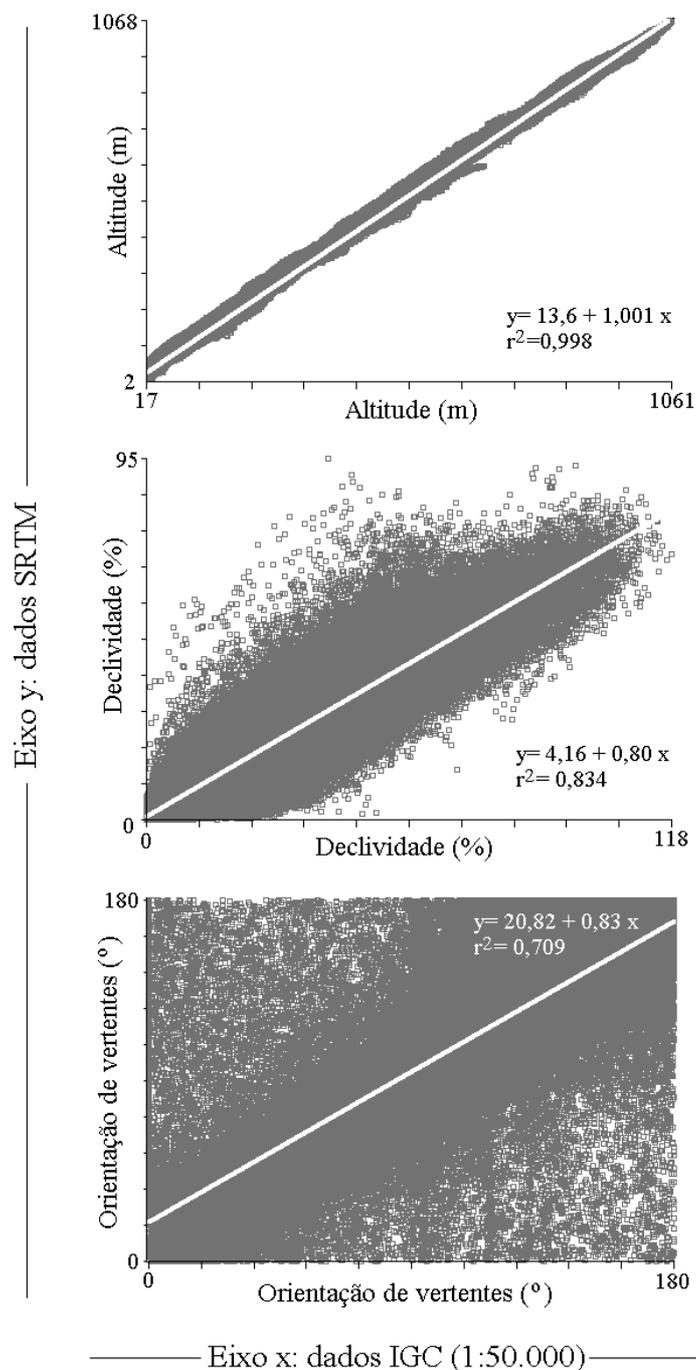


FIGURA 4.17 - Dispersão dos resultados morfométricos entre dados SRTM e de cartografia (IGC-1:50.000). MDE com resolução de 20m. Área de Ubatuba.

A comparação de altimetria pouco se faz sensível quando feita na forma de níveis de cinza (Figura 4.16-A). Quanto maior a amplitude altimétrica da área observada, maior a probabilidade de que as diferenças na informação topográfica entre um e outro modelo ocorram dentro de uma mesma faixa de percepção do brilho. Para a comparação desta variável, a análise de dispersão (Figura 4.17) mostra-se muito mais útil. O coeficiente angular da equação de regressão, associado ao coeficiente de regressão (ambos muito próximos a 1,0), indica que a altimetria do modelo SRTM guarda alta correlação com aquela registrada pelo IGC em cartas 1:50.000. A diferença sistemática, dada pelo coeficiente linear de 13,6m corresponde à diferença local de datum vertical (IGC: marégrafo de Imbituba; SRTM: WGS84).

A declividade constitui um teste mais rigoroso, pela capacidade dos cálculos derivativos de evidenciar estruturas que se apresentam sutis na variável de primeira ordem (*i. e.*, altimetria). Na forma apresentada (Figura 4.16-B), as classes de declividade mostram poucas diferenças em sua distribuição geral. Mas há ao menos duas fontes principais de diferenças, responsáveis pela dispersão da declividade (Figura 4.17), que são as diferenças de resolução (horizontal e vertical) e o próprio desempenho do algoritmo de declividade, que varia em função de características do MDE. No primeiro caso, o registro de manchas detalhadas de classes de declividade dos dados SRTM (Figura 4.16-B) estão limitados ao detalhamento possível sob uma resolução de 90m, o que se faz notar principalmente nas classes mais íngremes. A resolução vertical dos dados corresponde a uma vantagem inversa, pois os dados SRTM permitem o registro de variações (1m) que ocorrem dentro de um mesmo intervalo de equidistância vertical. Desse modo, a declividade das áreas planas, como o caso da planície litorânea, foi melhor estimada com estes dados do que com dados cartografados em curvas de nível. Ao contrário desses condicionantes intrínsecos, o desempenho do algoritmo de declividade pode ser modificado através de adaptações do programa em questão, de modo que o resultado sobre o modelo SRTM seja o mais próximo possível daqueles obtidos com maior controle.

A orientação de vertentes (Figura 16-C) é entre estas a variável mais sensível a diferenças de resolução e escala dos dados que compõem os modelos. No entanto, a visualização do produto ADD não mostra diferenças muito expressivas entre os modelos. No modelo feito com dados IGC, observa-se um número maior de canais de drenagem evidenciados nas partes mais inclinadas. Por outro lado, a falta de curvas de nível em áreas de baixa amplitude como a planície litorânea impede completamente a evidenciação da estrutura de drenagem nesta área. O diagrama (Figura 4.17) apresenta uma grande dispersão da orientação de vertentes. Apesar do coeficiente de determinação estar subestimado pelo fato da orientação ser uma variável circular, este pode ainda ser considerado alto, em comparação com a relação entre dados medidos cartograficamente e processados digitalmente em SIG.

A Figura 4.18 compara a visualização ADD do modelo SRTM (resolução de 1arcseg ou ~28m) com um MDE obtido com digitalização de curvas de nível na escala 1:10.000 (resolução de 20m), de uma microbacia agrícola do Estado de São Paulo.

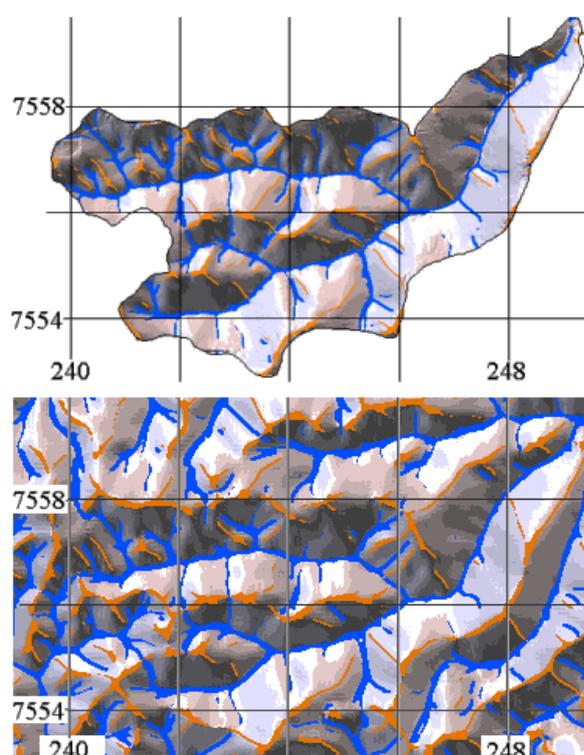


FIGURA 4.18 – Microbacia do córrego São Joaquim (ADD). MDE formado a partir de dados topográficos IPT 1:10.000 (sup.) e SRTM (inf.).

A comparação permitiu verificar que neste relevo houve poucas perdas em termos de canais de drenagem e divisores de água evidenciados com a adoção dos dados SRTM. A possibilidade de uso dos dados SRTM para geoprocessamento de dados topográficos em escalas em torno de 1:25.000 representa uma importante perspectiva para aplicações em levantamentos do meio físico para diagnósticos e planejamento de manejo e uso do solo. Deve-se considerar esta perspectiva restrita, porém, a ambientes agrícolas, cuja distribuição se concentra preferencialmente em áreas de relevo pouco movimentado.

### **3.5 – Proposta metodológica**

Os resultados deste estudo, em conjunto com conhecimentos anteriores e da bibliografia, mostraram as importantes vantagens em se modificar a resolução espacial de 3arcseg para 1arcseg, por vários motivos. Grande parte do esforço de desenvolvimento metodológico se concentrou na aplicação da krigagem, com vistas a características do MDE favoráveis à obtenção de variáveis morfométricas, tais como declividade, curvatura vertical e horizontal, comprimento de rampa e orientação de vertentes. No entanto, considera-se fundamental a manutenção das cotas originais através tanto do armazenamento dos dados originais como em modelos elaborados através de interpolação linear, para estudos em que se queira a máxima exatidão dos níveis altimétricos, ou nos quais se queira recuperar o registro de objetos sobre a superfície terrestre, entre outras utilizações. Além disso, o armazenamento dos dados originais permitirá a elaboração particularizada de MDE em áreas menores, otimizando a análise geoestatística, ou mesmo com outras metodologias, para o atendimento da finalidade de interesse.

Com relação à aplicação da krigagem sobre os dados SRTM em todo o território nacional, além da demanda operacional, resta um importante obstáculo de natureza técnico-científica, que é a padronização dos modelos de semivariância, cujos coeficientes controlam esta forma de interpolação. Os modelos mostraram-se passíveis de unificação isoladamente para os Estados do Acre e São Paulo, este de topografia bem diversificada. Contudo, não se conseguiu conciliá-los entre si com um único modelo de krigagem. Há para isso várias alternativas de padronização dentro de segmentos

significativos do ponto de vista político-administrativo (Estados, regiões), ambientais (biomas) ou mesmo estratégico (vocação econômica, agrícola etc.). Esta questão em particular vai requerer muitos testes similares ao presente estudo, que contemplem os diversos domínios morfoclimáticos brasileiros. Conforme observado, apenas a execução de análises geoestatísticas estratificadas em função de compartimentos previamente definidos não deve ser suficiente para subsidiar a escolha dos modelos de interpolação. Tal decisão será estendida a uma grande área, com os proporcionais custos de recursos computacionais (tempo de processamento e espaço de memória) e demanda de mão-de-obra. Dado este efeito multiplicativo e a necessidade de intervenção humana nesta etapa, a avaliação dos modelos deve preferencialmente percorrer toda a cadeia metodológica até a obtenção final dos MDE para apreciação dos resultados.

Propõe-se que o usuário tenha à sua disposição: dados Originais (3'') e MDE krigados (1''). Uma ampliação desse banco de dados poderia incluir ainda planos de informação das variáveis morfométricas, calculadas sob métodos automáticos devidamente avaliados, resultando na estrutura de utilização esquematizada na Figura 4.19.

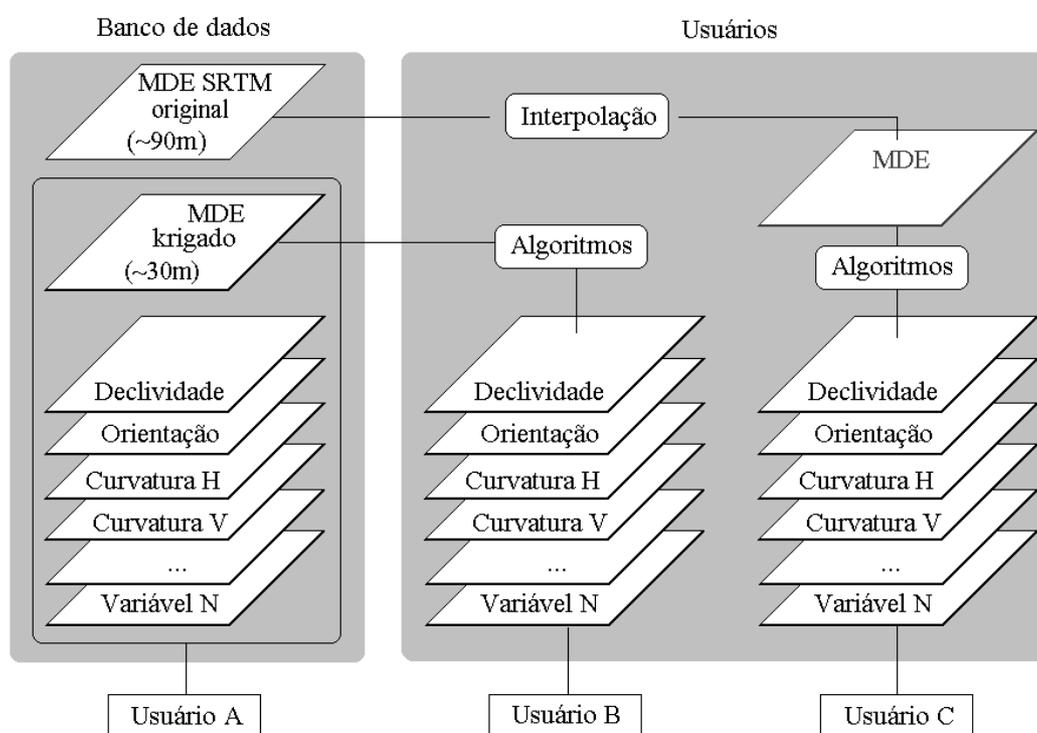


FIGURA 4.19 – Estrutura de utilização do banco de dados SRTM.

Nesta hipótese, atende-se o maior grupo de usuários (Usuário A), que pode utilizar os dados morfométricos diretamente do banco de dados, sem que seja necessário o domínio de nenhuma das etapas que precedem a obtenção das variáveis. Assim, estudiosos com variados graus de capacitação em geoprocessamento poderão utilizar as informações previamente geradas. A estes se acrescentam usuários mais habilitados que aceitam as informações disponibilizadas, por estarem de acordo com as metodologias, ou por questões de ordem operacional, e as incorporam em seu fluxo de trabalho.

Um grupo menor de usuários (Usuário B) pode aplicar os modelos preparados em seus próprios cálculos para obtenção das mesmas variáveis ou de outras, apropriadas a finalidades específicas que não são atendidas com as variáveis disponibilizadas. Neste grupo de usuário espera-se encontrar pessoas capacitadas ao manuseio de MDE (com aplicação e eventualmente criação de algoritmos de análise) que, por motivos técnicos ou operacionais, optam pelo MDE preparado.

Um terceiro grupo (Usuário C) pode fazer uso dos dados originais, com metodologia própria de criação do MDE e de análise. A disponibilização dos dados originais é um componente de segurança para a possibilidade de interrupção da oferta de dados pela USGS. Os interessados nos dados originais são aqueles que desejam, por exemplo: a observação dos objetos terrestres sobre o terreno; outras análises dependentes do modelo original; modelos diferentes daqueles gerados por krigagem (que preservem características texturais, por exemplo); krigagem (ou outra interpolação) otimizada para uma área específica; e krigagem (ou outra interpolação) otimizada em extratos.

No fluxo de operações para os três tipos de usuário, é importante lembrar que modificações no MDE antes da aplicação de algoritmos devem ser evitadas. Portanto, os processos de georreferência, mudança de projeções e de resolução espacial devem incidir sobre os resultados finais das análises, para não comprometer o desempenho dos algoritmos.

Pode-se estimar a demanda de mão-de-obra e recursos computacionais para a aplicação dos métodos preconizados por este estudo em escala nacional. Iniciamos a

decomposição do produto a partir de sua definição, estabelecida de acordo com as observações relatadas. O dimensionamento da demanda por espaço de memória e tempo computacional pode variar, em função dos formatos e das metodologias adotadas, além da capacidade do equipamento em uso. Esses aspectos estão quantificados na Tabela 4.2, de acordo com os formatos e as metodologias adotados neste estudo.

TABELA 4.2 – Tamanho dos arquivos usados e criados, em MB

Componente	TIFF	TXT	.GRD (binário)	.GRD (ASCII)	.IMG (binário)	.IMG (ASCII)
Dados originais (resolução: 3')	<sup>1</sup> 8,439 <b>(3,090)</b>	92,813 (10,624)	8,438 <b>(2,344)</b>	8,864 (2,419)	-	-
<sup>2</sup> MDE krigados/ $N_1$ variáveis numéricas (resolução: 1')	-	-	75,938 (~64,...)	153,553 <b>(62,365)</b>	75,959 (61,140)	95,574 <b>(19,530)</b>
<sup>3</sup> $N_2$ Variáveis qualitativas (resolução: 1')	-	-	-	-	18,990 (3,503)	18,990 <b>(3,503)</b>
<sup>4</sup> Total (x555)	1.715	-	1.301	34.612	-	$N_1$ .(10.839) + $N_2$ .(1.944)

(<sup>1</sup>) entre parênteses o tamanho do arquivo compactado. (<sup>2</sup>) Os MDE krigados, obtidos no formato GRD ASCII diretamente do Surfer, foram armazenados no formato IMG (Idrisi).  $N_1$  é o número de variáveis numéricas derivadas do MDE selecionadas para o armazenamento. (<sup>3</sup>)  $N_2$  é o número de variáveis qualitativas (classes) selecionadas para o armazenamento; (<sup>4</sup>) referente aos números em negrito.

Com os dados da Tabela 4.2, pode-se estimar o espaço necessário para acomodar o banco de dados de acordo com seu conteúdo, no formato apresentado. Supondo-se a disponibilização dos seguintes componentes: dados originais em formato *.GRD* (1,301GB); MDE krigados em formato *.IMG ASCII* (10,839GB); 5 variáveis numéricas (declividade, orientação, curvatura horizontal, curvatura vertical) em formato *IMG ASCII* (43,356GB); 2 variáveis qualitativas (classes de curvatura e ADD) em formato *IMG ASCII* (21,678GB); tal banco requer pouco menos do que 78GB. Cada variável numérica adicional representa um aumento de 10,839GB. Evidentemente, outros formatos poderão ser adotados pelo critério de espaço ou por outros, como o atendimento a questões de acesso e de linguagem.

### 3.6 –Etapas futuras

É natural que haja uma evolução das fontes de dados digitais disponíveis e das metodologias para seu tratamento. Porém, a utilização dos dados topográficos deve intensificar a demanda técnica em nível e qualidade, à medida que os resultados se

tornam disponíveis e incorporados no fluxo dos trabalhos de pesquisa ou da cadeia produtiva. Portanto, um banco de dados digital deve permitir sua constante atualização. A Figura 4.20 apresenta o ciclo de desenvolvimento de um banco de dados em que estão previstas atualizações advindas de seu uso.

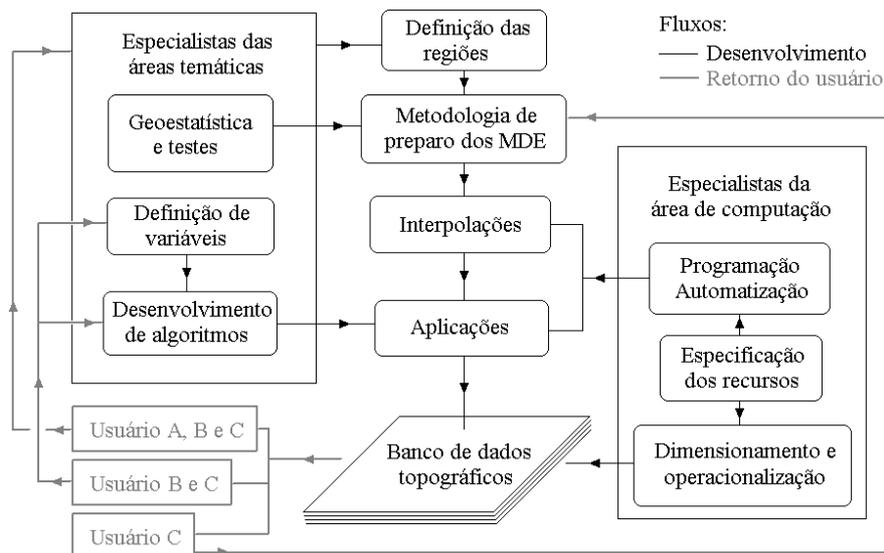


FIGURA 4.20 – Ciclo de desenvolvimento proposto para o banco de dados topográficos.

Para iniciar este processo, uma primeira montagem requer o estabelecimento de regiões passíveis de uniformização das características de tratamento. É necessário determinar o número mínimo de estratos sob o qual a maior parte das características locais estejam representadas de modo aceitável. Os primeiros testes para isso se baseiam nas análises geoestatísticas, a distribuição dos tipos agrupáveis de semivariogramas e a verificação dos resultados de sua aplicação.

Estes testes já deverão ser precedidos e acompanhados pela observação de um grupo de especialistas das áreas temáticas de reconhecida aplicação dos dados topográficos em escalas cartográficas, como geomorfologia, geologia, hidrografia e pedologia, por exemplo. É necessário uma convergência do atendimento das necessidades de diferentes áreas para um maior grau de sucesso na uniformização metodológica. Nesta etapa de consenso, também se deve estabelecer quais variáveis devam estar disponíveis, a

princípio, e uma ordem de prioridade entre estas. A prioridade de cada variável é uma informação muito importante para uma decisão diante do limite de recursos finitos. As questões referentes a aspectos computacionais, como formas de armazenamento e transmissão dos arquivos, o dimensionamento do equipamento e a programação dos processos automatizáveis, devem ser atendidas em paralelo, por uma equipe apropriada, com especialistas da área de computação.

A partir da disponibilização dos dados, deve-se garantir o retorno da comunidade de usuários como forma de direcionamento da segunda concepção do banco de dados. Para uma reformulação definitiva (embora temporariamente) de suas características, é necessário saber: quais são as aplicações pretendidas; quais dados são utilizados e como; e como é o desempenho dos dados para estas aplicações; quais as outras informações de interesse. A pesquisa metodológica deve contrapor a estas questões as possibilidades e limites do estado da arte de modelagem digital da topografia para o atendimento do usuário. Embora tenha implicâncias diretas somente para uma segunda versão do banco de dados, é necessário prever e garantir essa interação planejando-a da melhor forma possível logo na sua primeira versão.



## CAPÍTULO 4

### CONCLUSÕES

Foi observado que os dados SRTM exprimem a elevação da superfície com todos objetos presentes no terreno, diferentemente da característica desejável a dados topográficos, que devem representar somente o terreno.

Entre as feições expressas na variação destes dados além da informação topográfica estão edificações, desmatamento, obras de corte/aterro, represas, bem como o nível da superfície de corpos d'água extensos.

Mais do que pelas falhas de cobertura, freqüentes em áreas alagadas e ocasionalmente em áreas íngremes, não se recomenda a utilização direta dos dados SRTM originalmente disponibilizadas para a América do Sul devido à sua resolução espacial e a características indesejáveis, para as seguintes aplicações:

- processamentos digitais derivativos para mapeamento de variáveis morfométricas (declividade, orientação, drenagem, divisores, curvatura etc.) em qualquer escala.
- interpretação visual em escalas de 1:250.000 a menores em terrenos com alta freqüência de feições (interflúvios de 100m a 400m, por exemplo) e pequenas amplitudes (10m a 30m); em terrenos de relevo mais pronunciado, pode-se avançar a interpretação de algumas feições que permanecem visíveis a escalas maiores, até 1:100.000.

A mudança da resolução de 3arcseg para 1arcseg por interpolação linear realçou a presença de objetos e feições detalhadas em detrimento da informação topográfica.

Quando se consideraram os Estados de São Paulo e Acre em dois conjuntos, estes apresentaram variabilidade espacial ajustada a modelos distintos, que não se mostraram intercambiáveis do ponto de vista da geração de MDE por krigagem; por outro lado, foi possível interpolar cada Estado por um único modelo de variabilidade.

As diferenças e semelhanças dos modelos teóricos de variabilidade ajustados aos dados originais não mostraram relação com a compartimentação do relevo na escala estadual de São Paulo.

A mudança da resolução de 3arcseg para 1arcseg por krigagem reduziu efeitos indesejáveis de objetos sobre o terreno e de ocasionais artefatos, favorecendo a geração de curvas de nível, a extração digital de variáveis topográficas e a definição de feições de drenagem relativamente detalhadas.

Os testes com dados tratados pela técnica proposta indicaram sua viabilidade para utilização (interpretação visual e processamentos digitais) em estudos de microbacias nas escalas de 1:50.000, de modo geral, e até 1:10.000, conforme o relevo local e a finalidade de sua análise.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Band, L. E. Topographic partition of watersheds with digital elevation models. **Water Resources Research**, v. 22, n. 1 p. 15-24, 1986.

Blomgren, S. A digital elevation model for estimating flooding scenarios at the Falsterbo Peninsula. **Environmental Modelling & Software**, v. 14, p. 579-587, 1999.

Briggs, D. J.; Shishira, E. K. Soil variability in geomorphologically defined survey units in the Albudeite area of Murcia Province, Spain. In: Jungerius, P. D. (ed.). **Soils and geomorphology** (Catena supplement no 6). 1985. cap. 2, p.69-84.

Brubaker, S. C.; Jones, A. J.; Lewis, D. T.; Frank, K. Soil properties associated with landscape position. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 57, n. 2, p. 235-239, 1993.

Castro, A. G.; Valério Filho, M. Simulação da expectativa de perdas de solo em microbacia sob diferentes manejos florestais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.21, n.3, p.419-26, 1997.

Castro, J. F. M; Viadana, J. G. A relevância da cartografia nos estudos de bacias hidrográficas: o exemplo da bacia do rio Corumbataí. **Geografia**, v. 27, n. 3, p. 157-169, 2002.

Dent, D.; Young, A. **Soil Survey and Land Evaluation**. London: George Allen & Unwin (Ed.), 1981. 278p.

Desmet, P. J. J.; Govers, G. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 51, n. 5, p. 427-433, 1996.

Eastman, J. R. **Idrisi for Windows: User's Guide**. Worcester: Clark University, 1995. 440p.

Fahsi, A.; Tsegaye, T.; Tadesse, W.; Coleman, T. Incorporation of digital elevation models with Landsat-TM data to improve land cover classification accuracy. **Forest Ecology and Management**, v. 128, p. 57-64, 2000.

Florinsky, I. V.; Kuryakova, G. A. Influence of topography on some vegetation cover properties. **Catena**, v. 27, p. 123-141, 1996.

Franklin, S. E.; Lavigne, M. B.; Hunt Jr., E. R.; Wilson, B. A.; Peddle, D. R.; McDermid, G. J.; Giles, P. T. Topographic dependence of synthetic aperture RADAR imagery. **Computers & Geosciences**, v.21, n.4, p.521-532, 1995.

Gao, J. Comparison of sampling schemes in constructing DTMs from topographic maps. **ITC Journal**, v.1995, n.1, p. 18-22, 1995.

Giles, P.T.; Franklin, S.E. An automated approach to the classification of the slope units using digital data. **Geomorphology**, v.21, p251-264. 1998.

Giles, P.T.; Franklin, S.E. Comparison of derivative topographic surfaces of a DEM generated from stereoscopic SPOT images with field measurements. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v.62, n.10, p.1165-1171. 1996.

Golden Software. **Surfer Version 6.01- Surface Mapping System**. Golden: Golden Software, Inc., 1995.

Guth, P. L. Contour line "ghosts" in USGS Level 2 DEMs. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 65, n.3, p.289-296, 1999.

Iri, M.; Shimakawa, Y.; Nagai, T. Extraction of invariants from digital elevation data with application to terrain topography. **Nonlinear Analysis**, v.47, p.5585-5598. 2001.

Justice, C. O.; Wharton, S. W.; Holben, B. N. Application of digital terrain data to quantify and reduce the topographic effect on Landsat data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 2, n. 3 p. 213-230, 1981.

Kinnel, P. I. A slope length factor for applying the USLE-M to erosion in grid cells. **Soil and Tillage Research**, v.58, n.1, p.11-17, 2001.

Koch, A.; Heipke, C.; Lohmann, P. Bewertung von SRTM Digitalen Geländemodellen – Methodik und Ergebnisse. **Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation**, v.6, p.389-398, 2002.

Kubik, K.; Botman, A. G. Interpolation accuracy for topographic and geological surface. **ITC Journal**, v.1976, n.2, pp. 236-273, 1976.

Li, Z. Variation of the accuracy of digital terrain models with sampling interval. **Photogrammetric Record**, v.14, n.79, p.113-128, 1992.

Meijerink, A. M. J. Data acquisition and data capture through terrain mapping units. **ITC Journal**, v.1988, n. 1, p.23-44, 1988.

Miliaresis, G. Geomorphometric mapping of Zagros Ranges at regional scale. **Computers and Geosciences**, v.27, n.7, p.715-728, 2001.

Miliaresis, G.; Argialas, D. Segmentation of physiographic features from the global digital elevation model/GTOPO30. **Computers and Geosciences**, v.25, n.7, p.715-728, 1999.

Minitab Inc. **Meet MINITAB, Release 13 for Windows**. Pennsylvania: State College, 2000. não paginado.

Mizukoshi, H.; Anyia, M. Use of contour-based DEMs for deriving and mapping topographic attributes. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 68, n. 1, p.83-93, 2002.

Molnár, D. K.; Julien, P. Y. Estimation of upland erosion using GIS. **Computers and Geosciences**, v.24, n.2, p.183-192, 1998.

Moore, I. D.; Gessler, P. E.; Nielsen, G. A.; Peterson, G. A. Soil attribute prediction using terrain analysis. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 57, n. 2, p. 443-452, 1993.

Östman, A.. Quality control of photogrammetrically sampled Digital Elevation Models. **Photogrammetric Record**, v.12, n.69, 333-341, 1987.

Özdamar, L; Demirhan, M.; Özpinar, A. A comparison of spatial interpolation methods and a fuzzy areal evaluation scheme in environmental site characterization. **Computers, Environment and Urban Systems**, v.23, p.399-422, 1999.

Pannatier, Y. **VarioWin: Software for Spatial Data Analysis in 2D**. New York: Springer-Verlag, 1996.

Ranieri, S. B. L.; Sparovek, G.; Souza, M. P.; Dourado Neto, D. Aplicação de índice comparativo na avaliação do risco de degradação das terras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n.4, p.751-60, 1998.

Reiss, P. High-quality DTMs. **GIM International**, v. 16, p. 40-43, 2002.

Remortel, R. D.; Hamilton, A. E.; Hickey, R. J. Estimating the LS Factor for RUSLE through Iterative Slope Length Processing of Digital Elevation Data within ArcInfo Grid. **Cartography**, v.30, n.1, p.27-35, 2001.

Research Systems Inc. **Environment for Visualizing Images – ENVI Version 3.6**. Colorado: Boulder, 2002. 126p.

Ross, J. L. S.; Moroz, I. C. **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo**. São Paulo, SP: FFLCH/USP e IPT/FAPESP, 1997. Mapas e Relatório.

Thompson, J. A.; Bell, J. C.; Butler, C. A. Digital elevation model resolution: effects on terrain attribute calculation and quantitative soil-landscape modeling. **Geoderma**, n.100, p.67-89, 2001.

Turcotte, R.; Fortin, J.-P.; Rousseau, A. N.; Massicote, S.; Villeneuve, J.-P. Determination of the drainage structure of a watershed using a digital elevation model and a digital river and lake network. **Journal of Hidrology**, v.240, p.225-242, 2001.

Valenzuela, C. R. Data analysis and models In: Belward, A. S.; Valenzuela, C. R. **Remote Sensing and Geographical Information Systems for Resource Management in Developing Countries**. Euro Courses: Remote Sensing, Netherlands: Kluwer, 1991. v.1, cap. 18, p. 335-48.

Valeriano, M. M.; Garcia, G. J. The estimate of topographical variables for soil erosion modelling through geoprocessing. International Congress of Photogrammetry and Remote Sensing, 33. Amsterdam, 2000. **International Archives of Photogrammetry & Remote Sensing**. Amsterdam: ISPRS, 2000, v.33, part B, p.678-685.

\_\_\_\_\_. ; Picini, A. G. Uso de Sistema de Informação Geográfica para a geração de mapas de médias mensais de temperatura do Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.8, n.2, p.255-262. 2000.

\_\_\_\_\_. ; Moraes, J. F. L. Extração de rede de drenagem e divisores por processamento digital de dados topográficos. [CD-ROM] In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 10, Foz do Iguaçu, 2001. **Anais**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2001. Posters.

\_\_\_\_\_. ; Melo, A. R.; Sarraipa, L. A. S. ; Negreiros, I. P. M.; Pallone Filho, W. Formação de base topográfica digital (1:1.000.000) do Estado de São Paulo com dados RADARSAT-1. **Acta Scientiarum**, v. 24, n. 6, p.1825-1831, 2002a.

\_\_\_\_\_. ; Picini, A. G.; Mello, M. H. A. Estratificação de efeitos anisotrópicos do relevo na geração de mapas pluviométricos por geoprocessamento. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 10, n. 1, p. 167-177, 2002b.

\_\_\_\_\_. Programação do cálculo da declividade em SIG pelo método de vetores ortogonais. **Espaço e Geografia**, v.5, n.1, p.69-85, 2002a.

\_\_\_\_\_. **Modelos digitais de elevação de microbacias elaborados com krigagem**. São José dos Campos: INPE: Coordenação de Ensino, Documentação e Programas Especiais (INPE-9364-RPQ/736). 54p. 2002b.

\_\_\_\_\_. ; Carvalho Júnior, O. A. Geoprocessamento de modelos digitais de elevação para mapeamento da curvatura horizontal em microbacias. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.4, n.1, p.17-29, 2003a.

\_\_\_\_\_. 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, 2003b.

\_\_\_\_\_. Mapeamento da declividade em microbacias com sistemas de informação geográfica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, n.2, p.303-310, 2003c.

\_\_\_\_\_. ; Picini, A. G. **Geoprocessamento de informações agroclimatológicas**. São José dos Campos, SP: INPE: Coordenação de Ensino, Documentação e Programas Especiais (INPE-1028-RPQ/751). 133p. 2003.

Wladis, D. Automatic lineament detection using Digital Elevation Models with second derivative filters. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 65, n. 4, p.453-458, 1999.