



Ministério da
Ciência e Tecnologia



INPE-16701-RPQ/853

**TOPODATA: SELEÇÃO DE COEFICIENTES
GEOESTATÍSTICOS PARA O REFINAMENTO
UNIFICADO DE DADOS SRTM**

Márcio de Morisson Valeriano
Dilce de Fatima Rossetti

Do projeto de Produtividade em Pesquisa "Desenvolvimento de aplicações de dados topográficos SRTM", CNPq, processo n° 307530/2008-6(NV)

Registro do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/05.10.18.35>>

INPE
São José dos Campos
2010

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO:**Presidente:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Membros:

Dr^a Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr^a Regina Célia dos Santos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Dr. Ralf Gielow - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr. Wilson Yamaguti - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr. Horácio Hideki Yanasse - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Deicy Farabello - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Vivéca Sant´Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da
Ciência e Tecnologia



INPE-16701-RPQ/853

**TOPODATA: SELEÇÃO DE COEFICIENTES
GEOESTATÍSTICOS PARA O REFINAMENTO
UNIFICADO DE DADOS SRTM**

Márcio de Morisson Valeriano
Dilce de Fatima Rossetti

Do projeto de Produtividade em Pesquisa "Desenvolvimento de aplicações de dados topográficos SRTM", CNPq, processo n° 307530/2008-6(NV)

Registro do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/05.10.18.35>>

INPE
São José dos Campos
2010

“Mangueira sem marca de pedrada não dá manga boa.”
(popular)

Dedicado aos estudantes.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pela bolsa de Produtividade em Pesquisa associada a este trabalho.

Às estudantes Polyanna da Conceição Bispo (UFSCAR) e Letícia Midori Arashiro (UNITAU), que se dedicaram a atividades do projeto através de seus estágios, ainda na graduação.

A aplicação de resultados em pesquisas acadêmicas foi crucial para a percepção das demandas que justificam este projeto. Assim, não se poderia deixar de mencionar os mestrados, na PG-SER (INPE), de Elienê Pontes de Araújo, Polyanna da Conceição Bispo e Viviana Aguilar Muñoz (em andamento) como ricos laboratórios de testes. Da mesma forma, agradecemos a oportunidade de atuação em projetos de variados temas e instituições, pelo olhar de cliente, ao mesmo tempo neutro e crítico, que estes oferecem: *NEGOWAT* (IAC/CIRAD; FAPESP, coord. Raphaële Ducrot - CIRAD); *Integração de dados biológicos e geológicos no baixo Tocantins-Ilha do Marajó: chave na análise da biodiversidade* (FAPESP, coord. Dilce de Fátima Rossetti - INPE); *Sistema para monitoramento da regularização ambiental no espaço rural de Mato Grosso do Sul* (coord. João dos Santos Vila da Silva - EMBRAPA); *Estratégias, modelos e geotecnologias para a caracterização e monitoramento da agrossistemas cafeeiros de Minas Gerais* (CNPq, coord. Helena Maria Ramos Alves – EMBRAPA; UFLA); *Dados SAR/RADARSAT-2 para avaliar estrutura da vegetação na Floresta Nacional de Tapajós* (CNPq, coord. Yosio Edemir Shimabukuro - INPE), além de numerosas outras interações não-formalizadas.

A inúmeros correspondentes, ora anônimos, cujos pedidos, dúvidas, demandas e informações constituíram a força e a direção da iniciativa TOPODATA. Cremos que muitos destes estão aptos a dar prosseguimento a este trabalho, apenas iniciado.

Enfim, aos amigos, aos professores e aos familiares, pela cumplicidade involuntária que tomamos de vocês nos mínimos gestos.

RESUMO

Este trabalho apresenta os fundamentos teóricos e experimentais que levaram à seleção de um único conjunto de coeficientes geoestatísticos para o refinamento dos dados SRTM por krigagem em todo o território brasileiro. Esta seleção foi direcionada ao atendimento de condições que favorecem a exploração do potencial destes dados para a derivação em descritores topográficos, ou geomorfométricos, do terreno. As condições desejadas referem-se à preservação de características geométricas de detalhe do modelo digital de elevação (MDE) formado, sensíveis ao método empregado no refinamento da resolução de 3" para 1". Modelos geoestatísticos previamente selecionados em estudos regionais aplicados a projetos foram testados para seleção unificada em 40 áreas distribuídas nas diferentes províncias lito-estruturais do Brasil. As áreas testadas continham condições distintas de relevo, abrangendo desde terrenos montanhosos até terrenos planos. Foram observados os efeitos da preparação dos dados sobre a percepção de padrões (textura e rugosidade) bem como de singularidades (arestas, picos, talwegues etc.). Os resultados foram avaliados mediante representações em relevo sombreado, principalmente, além de transectos e perspectivas, observados em escalas diversas. Observou-se que terrenos de baixa amplitude, baixa declividade e feições delicadas têm MDE mais afetados pelos métodos de refinamento, enquanto terrenos montanhosos mostraram MDE relativamente mais estáveis. A avaliação, corroborada de modo inequívoco pela totalidade dos intérpretes consultados, convergiu para um modelo de refinamento de desempenho superior aos demais em todas as situações testadas.

TOPODATA: SELECTION OF GEOSTATISTICAL COEFFICIENTS FOR THE UNIFIED REFINING OF SRTM DATA

ABSTRACT

This work presents the theoretical and experimental fundamentals of the selection of a set of geostatistical coefficients for a unified SRTM data refining through kriging over the entire Brazilian territory. This selection aimed at favorable conditions for exploring the data potential in topographic descriptor derivations, or in geomorphometry. These conditions are given by the preservation of detailed geometric characteristics of the resulting digital elevation models (DEM), which are sensitive to the methods used to refine resolution from 3" to 1". Geostatistical models previously selected in regional studies applied to projects were tested for unified refining on 40 areas distributed among different litho-structural provinces of Brazil. Tested areas encompassed distinct relief conditions, from mountainous to plan terrains. The effects of data preparation were observed on the perception of patterns (texture and roughness) as well as singularities (edges, peaks, thalwegs etc.). Results were evaluated through the examination of shaded relief presentations, mainly, besides transects and perspectives, observed in different scales. Terrains with low slopes, small amplitude and delicate features had their DEM easily affected by the refining methods, while mountainous terrains showed a relative stability. The evaluation, unambiguously confirmed by all consulted interpreters, converged to a refining model with outstanding performance in all tested conditions.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS.....	
LISTA DE TABELAS.....	
1 INTRODUÇÃO	19
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E EXPERIMENTAL	21
2.1 Interpoladores	21
2.2 Krigagem	29
3 DESENVOLVIMENTO	35
3.1 Testes localizados por projetos	37
3.2 Seleção de áreas para testes	45
4 RESULTADOS.....	59
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	71
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	73

LISTA DE FIGURAS

2.1 - Variação das distâncias de cada amostra em relação ao <i>pixel</i> estimado.	23
2.2 - Esquemas de busca para interpolação de 3” para 1”.....	24
2.3 - Testes de refinamento 3” para 1” com diferentes interpoladores.....	26
2.4 - Superfícies produzidas por diferentes interpoladores sobre dados SRTM..	27
2.5 - Relevo sombreado das superfícies produzidas por diferentes interpoladores.....	28
2.6 - Semivariogramas.....	30
2.7 - Remoção da tendência para análise geoestatística dos resíduos..	32
3.1 - Dissociação entre compartimentos de relevo e variabilidade espacial dos dados..	36
3.2 - Seleção de coeficientes geoestatísticos para interpolação.....	37
3.3 - Teste de krigagem com diferentes semivariogramas (Codó, MA).....	39
3.4 - Exemplo de teste de transectos sobre fotografia, no Monte Roraima.....	40
3.5 - Exemplo de teste de transectos sobre fotografia, em Mamirauá.....	41
3.6 - Semivariogramas selecionados nas diferentes áreas de estudo.....	42
3.7 - Pesos dos semivariogramas da Figura 3.6 distribuídos em quadrado de 600m.	43
3.8 - Relevo sombreado das superfícies produzidas por diferentes krigagens.....	44
3.9 - Relevo sombreado das áreas testadas.....	46
3.10 - Distribuição das áreas testes nas diferentes províncias litoestruturais (IBGE)....	48
3.11 - Relevo das áreas de estudo 2 (A), 18 (B), 25 (C) e 40 (D).	49
3.12 - Relevo das áreas de estudo 31 (A), 34 (B), 39 (C) e 16 (D).	51
3.13 - Relevo das áreas de estudo 23 (A), 33 (B), 36 (C) e 37 (D).	52
3.14 - Relevo das áreas de estudo 4 (A), 6 (B), 7 (C) e 38 (D).	53
3.15 - Relevo das áreas de estudo 13 (A), 15 (B), 24 (C) e 35 (D).	54
3.16 - Relevo das áreas de estudo 11 (A), 10 (B), 21 (C) e 12 (D).	55
3.17 - Relevo das áreas de estudo 1 (A), 3 (B), 5 (C) e 14 (D).	56
3.18 - Distribuição do efeito dossel relacionada à formação de bacias sedimentares geradas por falhas, no sudeste da Ilha do Marajó.....	57
4.1 - Teste de interpoladores sobre área montanhosa (I): morros de topo arredondado. 60	
4.2 - Teste de interpoladores sobre área montanhosa (II): chapada, escarpa e arestas... 61	
4.3 - Teste de interpoladores sobre linha de cumeeada em arestas agudas.	63
4.4 - Teste de interpoladores sobre textura de alta densidade de drenagem.....	64
4.5 - Teste de interpoladores sobre terreno baixo-predominante.	65
4.6 - Teste de interpoladores sobre terreno alto-predominante.	66
4.7 - Teste de interpoladores sobre feições de alta frequência espacial.	68
4.8 - Imagem ótica (<i>Google Earth</i>) das Paleodunas mostradas na Figura 4.7.	69

LISTA DE TABELAS

3.1 - Coeficientes de semivariogramas selecionados para diferentes áreas de estudo. . .	42
3.2 - Áreas selecionadas para testes.....	47

1 INTRODUÇÃO

Os Modelos Digitais de Elevação (MDE) são representações de dados topográficos passíveis de tratamento em Sistemas de Informações Geográficas (SIG). O processamento destes dados em SIG permite a caracterização do estado e de processos do sistema terrestre em abordagem espacializada. Uma vez estruturados em colunas e linhas, em analogia às imagens de satélite, os valores de altitude podem ser integrados a outras informações diretamente ou após serem operados para a determinação de variáveis topográficas derivadas da altimetria. Nesse contexto, a tomada de dados em cobertura global pela SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) representa uma oferta até então inédita de MDE, por áreas relativamente desprovidas de mapeamentos topográficos. A iniciativa TOPODATA propõe que derivações básicas da informação topográfica (declividade, orientação de vertentes, curvaturas etc.), a partir de dados SRTM, estejam prontamente à disposição da comunidade para seu uso. Esta e muitas outras aplicações dependem de processamentos aplicados aos dados altimétricos, por vezes afetados pelas características do MDE, que desfavorecem a relação de veracidade para com o relevo de fato representado. Especificações do MDE tais como resolução, precisão/exatidão etc. podem causar mais variações nos resultados do que as características do próprio relevo, o que faz da preparação de MDE muito mais do que uma formalidade computacional para atendimento de fluxos. Coerentemente, o pré-processamento de dados topográficos é reconhecido como uma etapa importante para determinar seu potencial e limitações de uso. No caso de MDE advindo de sensoriamento remoto, como dados SRTM, tal aspecto é ainda mais importante, visto que dados remotos trazem consigo limitações intrínsecas devido a uma série de fatores que atuam ao longo de todo o fluxo da informação.

As primeiras observações sobre os dados SRTM disponibilizados para a América do Sul (VALERIANO, 2004) indicam que estes apresentam fortes restrições à sua derivação na sua forma original, porém cuidados de pré-processamento permitem sua utilização com desempenho relativamente favorecido. Destas observações, decorre que muitos usuários modificam o dado original antes de sua utilização, no caso mais comum, com algum refinamento da resolução espacial, que corresponde originalmente a 3" (ou

aproximadamente 90m). Tal refinamento de resolução é feito normalmente mediante um processo de interpolação, em que se calculam valores de células (*pixels*) intermediários aos valores de entrada. Existem interpoladores diversos, cada qual com seu princípio, suas características e seus efeitos, cujos resultados diferem entre si quanto aos potenciais e limitações do MDE para cada finalidade. Entre estes, a krigagem é um processo de interpolação baseado na estrutura de variabilidade exibida pelos dados, que se pode determinar com análises geoestatísticas. Assim, a krigagem requer, além dos dados de entrada, informações geoestatísticas (coeficientes), que controlam a distribuição dos pesos para o cálculo dos valores interpolados. Uma vez que a krigagem realiza o cálculo de acordo com a variabilidade inerente aos dados, apresenta uma certa flexibilidade para comportar as características espaciais dos dados de entrada.

A facilidade de adaptação aos dados de entrada faz desta abordagem uma alternativa interessante para o pré-processamento dos dados SRTM com vistas à sua derivação em planos de informação geomorfométrica. Em função da possibilidade de se manipularem desejavelmente características do MDE no seu preparo, o desempenho das análises geomorfométricas pode ser favorecido de acordo com a metodologia adotada. No escopo do TOPODATA, a seleção dos coeficientes geoestatísticos foi estabelecida de modo empírico, pela avaliação dos resultados finais de testes exaustivos sobre o território nacional. Uma vez empírica, tal abordagem pode suscitar questionamentos quanto ao universo de possibilidades, às metodologias de análise, à abrangência dos testes e à sua própria fundamentação. Sem que se imponham os métodos selecionados como ideais (mesmo para as finalidades em questão), este documento tem como objetivo expor os critérios observados e a decorrente metodologia de unificação do pré-processamento dos dados SRTM para derivações geomorfométricas, materializada na seleção de coeficientes geoestatísticos para seu refinamento.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E EXPERIMENTAL

2.1 Interpoladores

De maneira simples, podemos descrever o processo de interpolação como uma estimativa da informação em locais não observados a partir de observações tomadas em sua vizinhança. Um exemplo típico é a confecção de mapas de chuva a partir de índices pluviométricos observados em postos distribuídos no espaço geográfico. Originalmente, os dados só existem nos postos de coleta, mas após este processo, a informação é estruturada de modo contínuo, formando o mapa da intensidade da chuva. Os métodos de interpolação, de modo geral, envolvem uma expressão numérica entre os pontos (x,y) de valor (z) conhecido para a estimativa dos valores desconhecidos em outros pontos. Assim, a informação geográfica localizada em pontos de observação poderá ser estruturada em linhas e colunas, como imagens digitais. Para isto, é preciso estimar, por interpolação, o valor de cada *pixel* da imagem, a partir dos dados de entrada. Em analogia aos mapas de chuvas, os Modelos Digitais de Elevação (MDE) podem ser descritos como uma imagem cujos valores representam a altitude e sua construção a partir de curvas de nível é feita por interpolações repetidas *pixel a pixel*.

Dado o princípio fundamental da interpolação, é possível conceber diversos métodos para seu cálculo, de acordo com a maneira com que os valores são computados nas estimativas. Os programas associados aos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) possuem uma série de recursos de interpolação para a formação de imagens numéricas a partir de dados tabulares. Embora dotados de diversos algoritmos de interpolação, grande parte dos aplicativos de SIG traz de fábrica uma configuração “default” para realizar interpolações ponderando os pontos de acordo com funções pré-estabelecidas, na maior parte dos casos. A função geral de interpolação calcula a cota (Z) de um *pixel* na posição j,k (linha j , coluna k) como uma média ponderada (pesos w_i) entre as cotas de sua vizinhança (z_i) , segundo a fórmula:

$$Z_{jk} = \Sigma (z_i \cdot w_i) / (\Sigma w_i) \quad (2.1)$$

A variação fundamental que existe entre diferentes interpolações se refere à determinação do peso w_i e ao conjunto de valores z_i incluídos no cálculo. Algumas

formas de estimativa restringem por si a forma de busca e o número de amostras (N), enquanto outras precisam que tais condições sejam definidas. No exemplo mais simples, o método conhecido pela expressão “vizinho mais próximo”, o valor Z é tomado diretamente da amostra mais próxima ao ponto de estimativa, o que restringe N ao valor unitário. Teóricos podem questionar se este método é realmente uma interpolação, uma vez que não há cálculo entre amostras. Porém, seguindo a Equação 1, o peso relativo desta amostra ($w_i / \sum w$) vale 1 enquanto todas as demais o têm nulo. No aspecto prático, valores passam a existir onde não havia informação, mesmo que a atribuição dos valores seja apenas uma expansão geométrica das observações pontuais: segue o princípio exato do método de Thiessen para mapeamento da precipitação.

O nível seguinte de complexidade agrupa valores de mais de uma amostra, aquelas que se enquadram num critério de busca, por exemplo, “as seis mais próximas”. Definido este conjunto, a estimativa será uma média ponderada das seis amostras mais próximas. Quando o cálculo corresponde a uma média aritmética simples (peso w_i constante, igual a $1/N$), o interpolador é comumente referido pela expressão “média móvel”. A variação da superfície, neste caso, será dada pela mudança no conjunto de amostras incluídas pelo método de busca ao longo das diferentes posições estimadas. Porém, grande parte dos interpoladores atribui o peso das amostras de acordo com suas respectivas distâncias em relação ao ponto estimado. As ponderações dependentes da distância seguem o princípio de que a influência de uma observação decresce à medida que nos afastamos da mesma. Nesse caso, mesmo com um número fixo de amostras incluídas na busca, a superfície produzida mostrará variações graduais em função da variação das distâncias (Figura 2.1).

No caso do refinamento dos dados SRTM de 3” para 1”, as posições nominais do MDE original constituem uma malha regular de amostras, da qual se deseja interpolar uma nova malha, 3 vezes mais densa em x e em y . Isso equivale a produzir 9 estimativas para cada dado de entrada. Os principais critérios de busca para esta configuração estão representados na Figura 2.2.

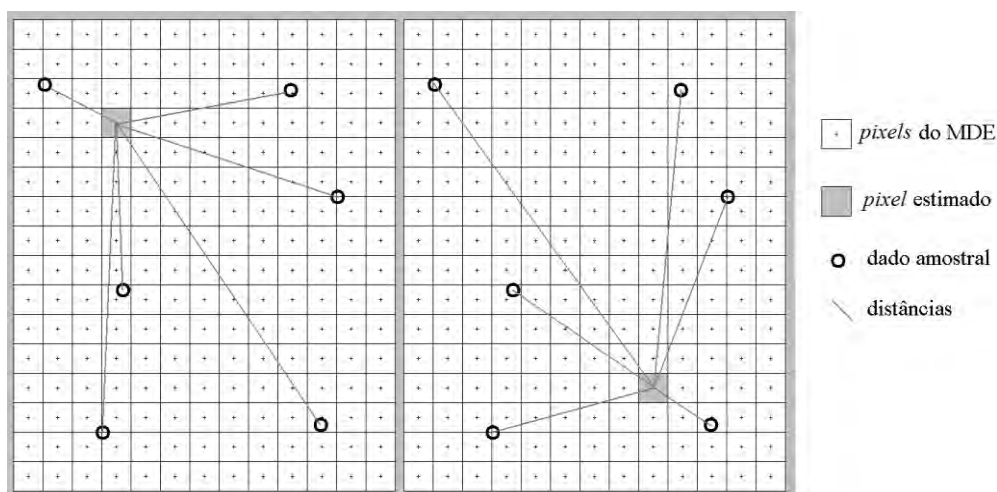


Figura 2.1 – Variação das distâncias de cada amostra em relação ao *pixel* estimado.

As buscas pelo esquema “vizinho mais próximo” e por rede irregular de triângulos remetem a interpoladores específicos, a primeira associada à interpolação de mesmo nome e a última associada à interpolação linear. O interpolador linear funciona de modo que a variação do valor estimado entre um dado amostral e outro seja constante, o que produz superfícies marcadas por faces retilíneas, ou planos inclinados. Uma vez que cada plano se define por três pontos no espaço tridimensional, o interpolador linear precisa se apoiar numa divisão da área em triângulos em cujos vértices se localizam as amostras. Dentro de cada triângulo, os valores assumem o valor local da superfície plana, em cada ponto estimado. Portanto, a partição do espaço em uma rede irregular de triângulos é estabelecida em etapa preliminar da interpolação linear, como uma necessidade intrínseca deste cálculo. A rede irregular de triângulos corresponde à expressão TIN (*Triangulated Irregular Network*), comumente usada (embora erroneamente) para se referir à interpolação linear ou a MDE assim produzidos. A rigor, o termo TIN, cujo núcleo é *Network*, ou rede, não se refere à interpolação nem ao MDE produzido e sim a uma abstração geométrica necessária à interpolação linear.

Numa tentativa de traduzir os termos de Özdamar et al. (1999), podemos qualificar estes interpoladores (vizinho mais próximo e linear) como *locais*, em contraposição aos interpoladores *regionais*, que integram um conjunto de amostras que esteja numa determinada área, ou região.

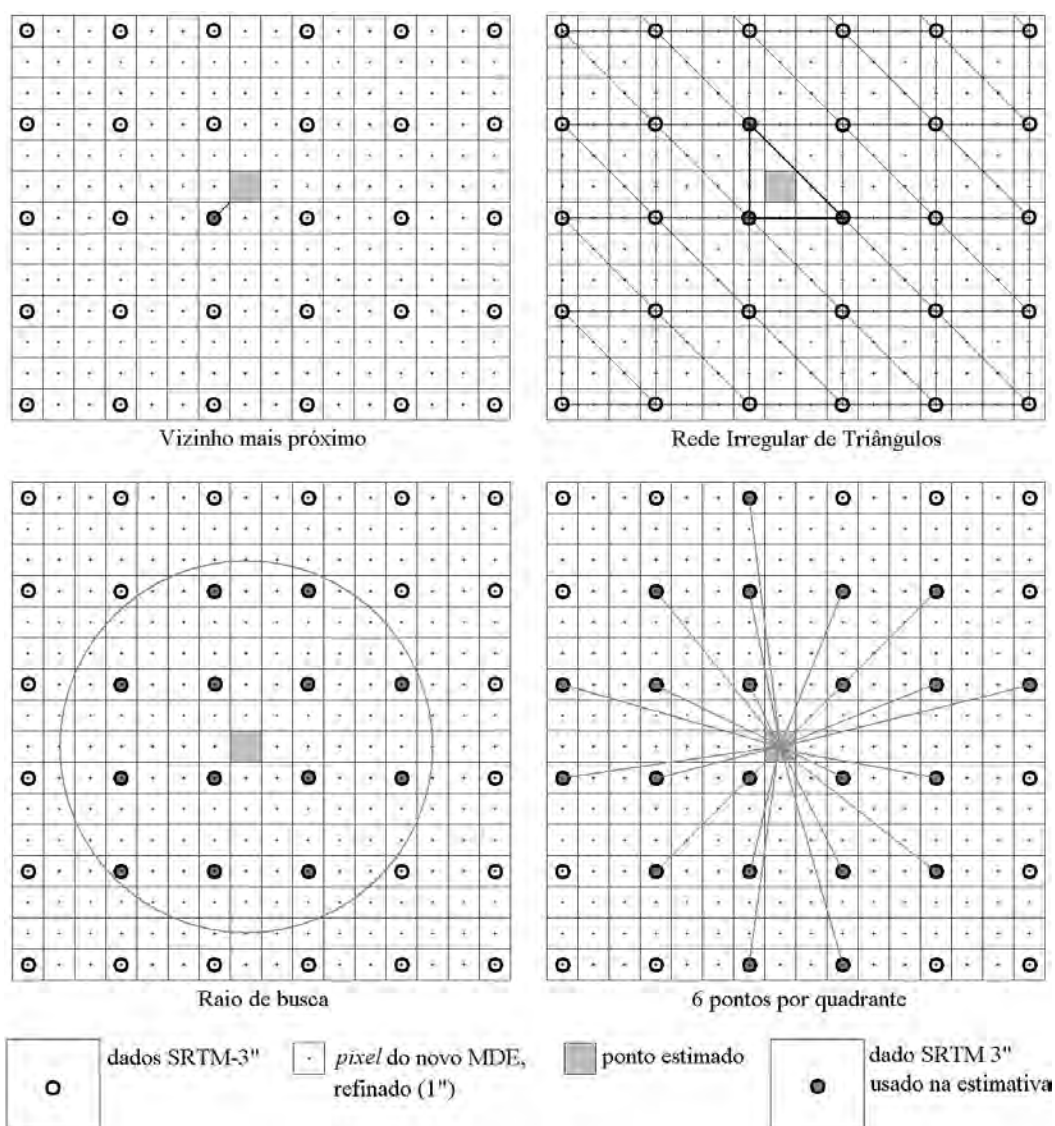


Figura 2.2 – Esquemas de busca para interpolação de 3'' para 1''.

A inclusão de amostras por raio de busca e por quadrantes faz parte dos métodos de interpolação regional, tal como a média móvel, já referida. No esquema por raio de busca, as amostras são incluídas desde que estejam dentro do raio estabelecido. Este esquema pode, como variante, se apoiar em elipses (dois raios), nos casos em que se deseja expressar variações anisotrópicas, quando a variável apresenta grau de variação dependente de direções (VALERIANO e PRADO, 2001; VALERIANO et al., 2002). Já os esquemas por quadrantes ou por octantes são essencialmente isotrópicos, isto é, não há diferenças de variação em função da direção analisada. Uma vez que lidam com uma

população de amostras x,y,z , a integração dos valores poderá ser feita de acordo com diferentes cálculos, o que confere uma série de efeitos com que cada método caracteriza o MDE. Os interpoladores polinomiais (quadráticos ou cúbicos), por exemplo, criam valores de acordo com a superfície ajustada aos pontos incluídos na estimativa. Interpoladores baseados no inverso da distância, como diz o nome, fazem uma média ponderada pelo inverso da distância elevado a uma potência especificada. Há interpoladores de formulação mais complexa, cujas opções de controle pelo usuário se referem diretamente a características do MDE produzido, tais como *Splines* e Curvatura Mínima, em que se especificam a rigidez, a sinuosidade e a aderência da superfície aos pontos de entrada. Devido ao número de possíveis abordagens, esgotar os inúmeros tipos de interpoladores, além de fugir da finalidade deste documento, torna-se impraticável. Para uma fundamentação geral sobre o assunto, a leitura de Watson (1994) é oportuna, embora nunca se possa estar seguramente atualizado devido à constante criação de novos interpoladores.

Diante da necessidade de se observar o efeito de métodos de interpolação sobre a distribuição do valor de uma amostra, podemos experimentar um MDE com as características geométricas dos dados SRTM, porém com um relevo hipotético, em que se tenha uma elevação unitária ($z = 1\text{m}$) no *pixel* central e as demais elevações nulas (Figura 2.3). Este modelo simula uma função (ou distribuição) conhecida como Delta de Dirac, uma solução utilizada para simular densidade de atributos pontuais, como é o caso do peso de uma amostra. No teste, foram aplicados diferentes interpoladores no refinamento, 3" para 1", sobre o MDE de entrada com dimensões 7x7. O raio de busca aplicado, quando pertinente, foi de 1km, aproximadamente. As grades apresentadas são quadradas, com 600m de lado e a escala da dimensão vertical não está padronizada, de modo que a variação relativa esteja evidente. Os resultados deste teste podem ser lidos como a distribuição do peso aplicado ao dado central em função da distância ao *pixel* estimado, nas mesmas condições do refinamento 3" para 1" dos dados SRTM. Portanto, as isolinhas, desenhadas a cada 0,05m de z , correspondem a 5% do peso total das amostras.

Embora todas superfícies da Figura 2.3 possam ser descritas como cones, são notáveis as diferenças de formato da distribuição de z entre os testes, que refletem o decréscimo

relativo do peso em torno da amostra. Em alguns casos, a superfície pontiaguda indica que o peso tende a se concentrar fortemente no local da amostra, enquanto em outros há um relativo nivelamento em torno, o que indica que o efeito a curtas distâncias se aproxima ao de uma média móvel.

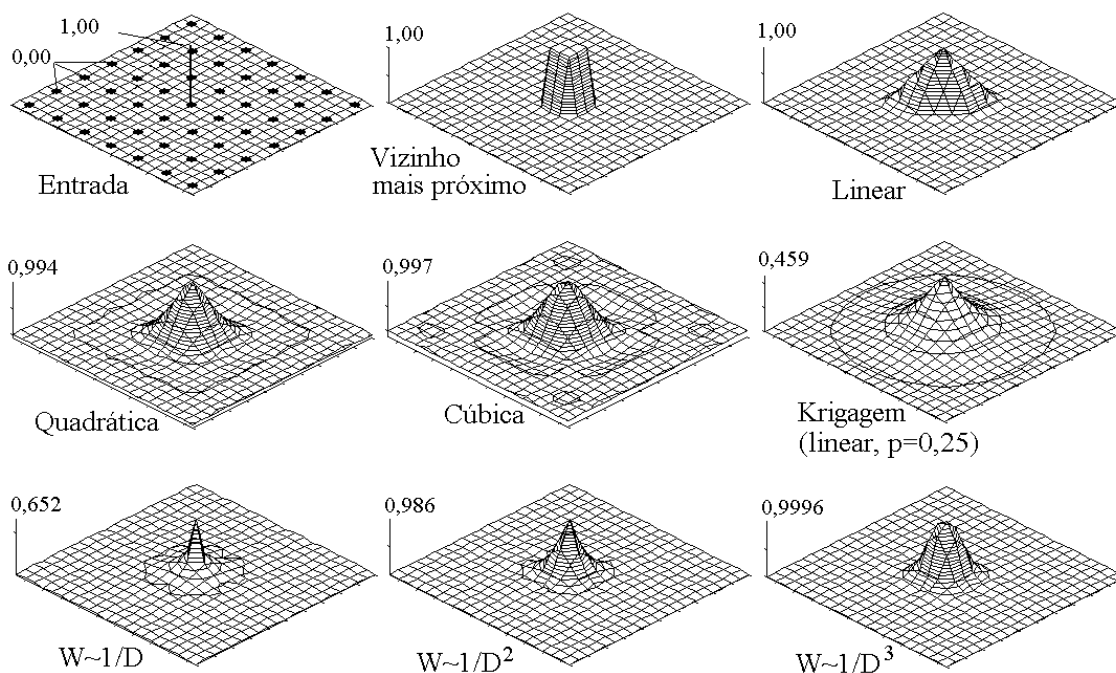


Figura 2.3 – Testes de refinamento 3” para 1” com diferentes interpoladores.

Observa-se que os pesos centrais não atingem obrigatoriamente o valor de entrada $z=1,00m$, exceto para os interpoladores linear e por vizinho mais próximo. Costuma-se dizer que tais interpoladores “honram” os dados de entrada. Na terminologia das comparações de Özdamar et al. (1999), estes são interpoladores *exatos*, em contraposição ao efeito dos demais, *inexatos*. Ressalta-se que alguns interpoladores podem assumir um caráter ou outro, de acordo com sua operação. Por exemplo, polinomiais serão exatos se o número de pontos incluídos na estimativa for exatamente o número mínimo de pontos necessários para o ajuste da superfície de ordem desejada. Como visto sobre dados de solos (VALERIANO e SANTOS, 2002), a krigagem torna-se tão mais inexata quanto maior for o efeito pepita (item 2.2; Figura 2.6), que no teste foi estabelecido como $p=0,25$, o que resultou num valor central de apenas 0,459m, ou

45,9% do peso da amostra em sua própria localidade. Os interpoladores baseados no inverso da distância aproximam-se do caráter exato à medida que se aumenta o expoente da distância. Outro aspecto modificado pelos métodos é o raio de influência da amostra, como se pode observar pela área da base dos cones, dada pela isolinha de menor valor. Enquanto tal raio está condicionado à distribuição de amostras vizinhas nos interpoladores locais (vizinho mais próximo e linear), nos interpoladores regionais, parâmetros intrínsecos à formulação do peso e opcionais (esquema de busca, por exemplo) são fatores preponderantes. A aplicação dos principais métodos de interpolação sobre um pequeno segmento (7x7) de MDE resulta nas grades apresentadas na Figura 2.4.

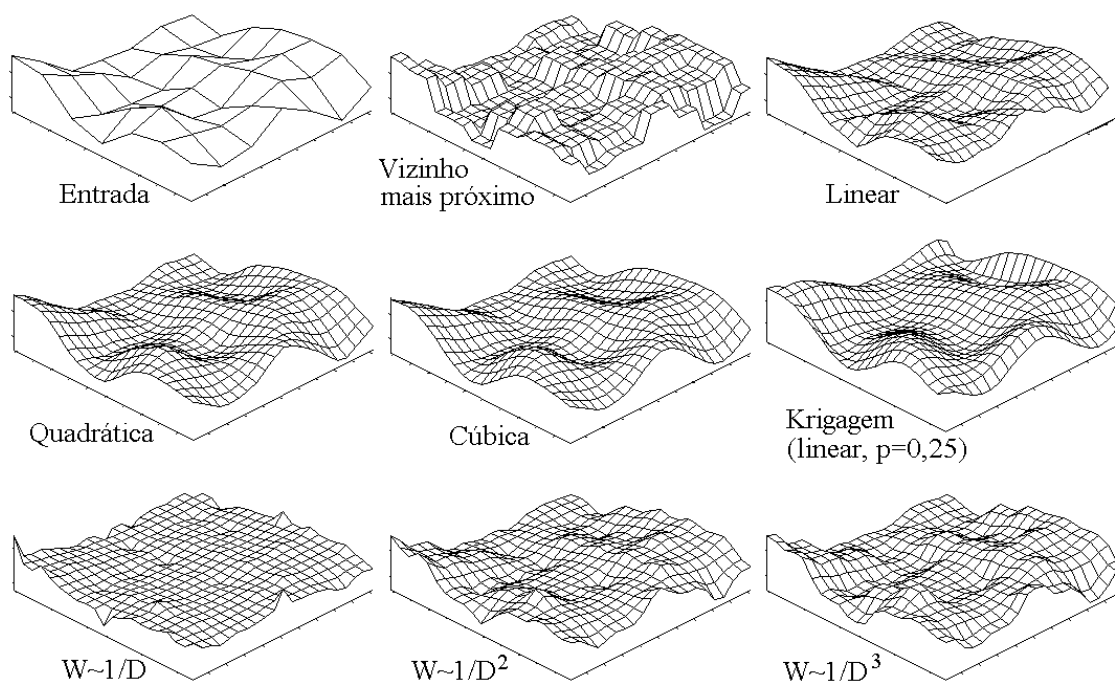


Figura 2.4 – Superfícies produzidas por diferentes interpoladores sobre dados SRTM.

Diante da dificuldade de se prever o efeito de todo conjunto possível de variantes e de parâmetros de operação dos diferentes interpoladores, a observação das superfícies produzidas constitui, evidentemente, uma forma eficaz de avaliação. Uma avaliação mais cuidadosa, porém, deve considerar os produtos derivados dessa superfície, de preferência, aqueles para os quais se destina o MDE em questão. No escopo do TOPODATA, o destino do MDE é essencialmente um conjunto de derivações para mapeamento da declividade, orientação de vertentes, curvatura, entre outras

informações. Decorre de sua relação com as primeiras derivadas (declividade e orientação) que a representação em relevo sombreado (Figura 2.5) é uma forma relativamente simples de visualização que revela prontamente algumas características de interesse nesse sentido (VALERIANO, 2007).

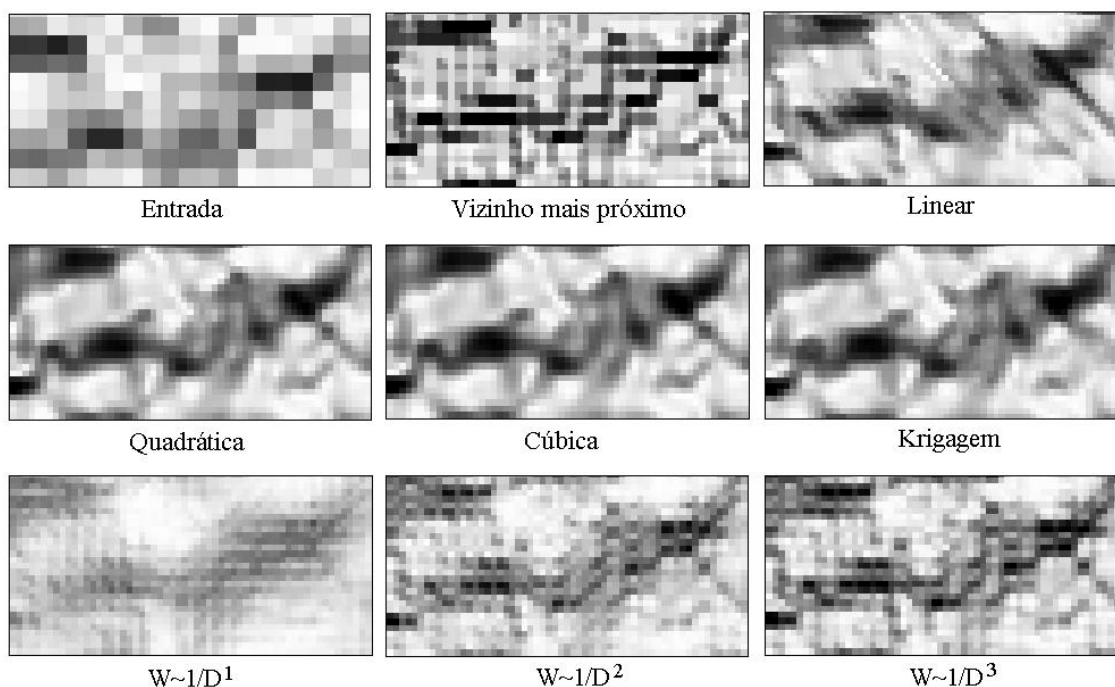


Figura 2.5 – Relevo sombreado das superfícies produzidas por diferentes interpoladores.

As superfícies interpoladas (Figura 2.5) mostram diferentes condições para derivações, muitas das quais claramente indesejáveis, outras promissoras. Entre os defeitos notáveis, listam-se o padrão “escada” (vizinho mais próximo), padrão retilíneo-geométrico (linear), além de textura reticulada (inverso da distância). Nestes últimos, é possível que tais defeitos sejam contornados ou atenuados com a modificação do esquema de busca, para se ajustar à frequência espacial dos dados de entrada. Estes defeitos afetam diretamente o cálculo das variáveis geomorfométricas, uma vez que tais derivações são efetuadas em intervalos (janelas móveis) de 2 a 3 *pixels*, o que resulta em variações artificiais e ruídos. No relevo exemplificado, as diferenças entre as superfícies obtidas por interpoladores polinomiais de 2ª e 3ª ordem (quadráticos e cúbicos, respectivamente) e por krigagem não se mostraram muito claras, embora se possa dizer que tiveram desempenho superior aos demais interpoladores. Para comparar resultados

de interpoladores de desempenhos semelhantes, é necessário testá-los em um conjunto de maior diversidade de condições de relevo.

2.2 Krigagem

De modo breve, a krigagem pode ser definida como um interpolador em que a variabilidade espacial dos dados condiciona a função que relaciona os pesos das amostras às suas distâncias. A variabilidade espacial de um dado (atributo) se refere à semelhança (ou à diferença) entre observações em função de sua proximidade no espaço. Observações muito próximas tendem a ter atributos iguais. Em contrapartida, a variância de estimativa tende a aumentar com o aumento da distância de amostragem. Tal comportamento define o que chamamos de uma variável regionalizada. É uma característica da estruturação espacial de fenômenos naturais que condiciona, limitando ou favorecendo, o mapeamento dos mesmos. As técnicas da geoestatística lidam com problemas de espacialização de variáveis e são uma alternativa interessante para entrada de dados em SIG (OLIVER e WEBSTER, 1990). Para a seleção de parâmetros geométricos na estruturação espacial dos dados, Cressie (1993) aponta os passos básicos a seguir:

- a) Analisar descritivamente os dados. Observar a distribuição espacial dos dados em mapas ou diagramas. Observar plotagens e resultados de análises geoestatísticas. Nesta etapa são utilizados os semivariogramas, variogramas, ou os autocorrelogramas, que apresentam a relação entre a dependência espacial e as distâncias entre amostras.
- b) Escolher modelos espaciais. Observar o comportamento, ou a variabilidade espacial dos dados experimentais e teóricos. Procurar semelhanças gráficas e conceituais entre modelos teóricos e os semivariogramas ou autocorrelogramas experimentais obtidos.
- c) Selecionar os parâmetros do modelo teórico através de estimativas criteriosas (coeficiente de ajuste, máxima verossimilhança, método dos momentos etc.).

Conjuntos de dados de variáveis ou de amostragens diferentes podem apresentar comportamento espacial diferente, dependendo do modo pelo qual as condições locais controlam o fenômeno. Portanto, os passos acima mencionados devem ser observados sempre que se queira gerar superfícies contínuas de uma determinada coleção de dados.

Com efeito, análises da variabilidade ou da dependência espacial vêm sendo incorporadas às metodologias de preparação de dados ambientais com vistas ao geoprocessamento (ENGLUND e SPARKS, 1988; OLIVER e WEBSTER, 1990; LEGENDRE, 1993; ATKINSON, 1996; e SALVIANO et al., 1998, para citar alguns exemplos). As técnicas de geoestatística são reconhecidas como adequadas nos estudos de variabilidade espacial, o que explica a preferência destes autores pela krigagem como método de interpolação, quando aplicada.

O semivariograma representa a estrutura de variabilidade espacial descrita pela variância estimada (eixo y) em função da distância (eixo x) entre pontos observados. Num exemplo ideal, apresenta-se como um gráfico crescente, devido à provável semelhança entre pontos a menores distâncias, até uma distância em que estabiliza num patamar de máxima variabilidade. Ao semivariograma experimental calculado a partir das observações ajustam-se modelos teóricos de semivariogramas, definidos pelo tipo de modelo (linear, esférico, gaussiano, exponencial, potência) e pelos seus coeficientes numéricos efeito pepita, escala e alcance (Figura 2.6).

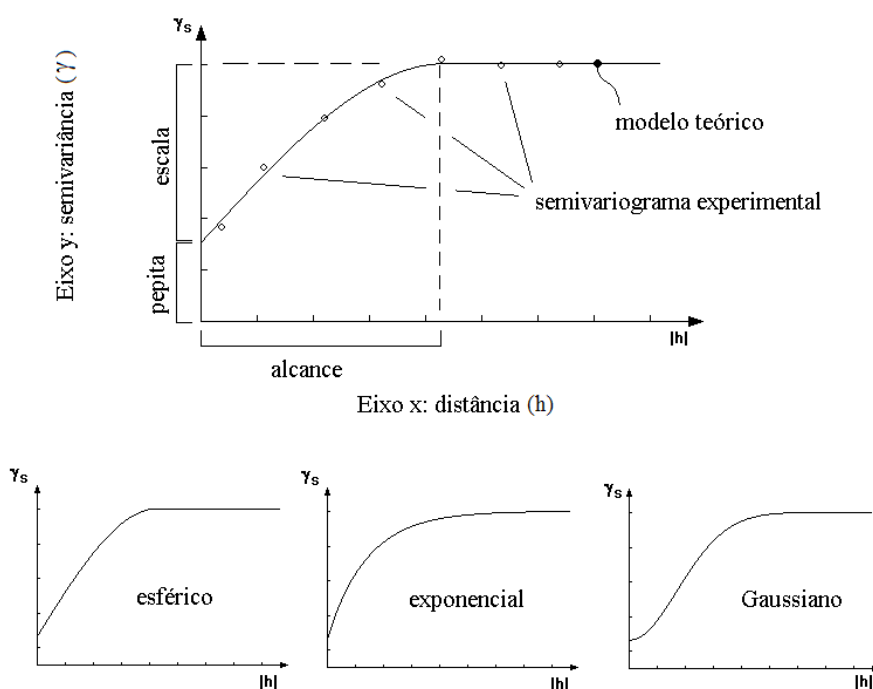


Figura 2.6 – Semivariogramas.

O alcance (*range* ou *length*) é indicado pela distância a partir da qual cessa o incremento da variância estimada, que atinge o valor de patamar. Representa o alcance

da dependência espacial, ou raio de influência atribuído a cada ponto amostrado sobre a variação dos atributos de sua vizinhança.

O semivariograma teórico ajustado (modelo) não intercepta obrigatoriamente a origem do gráfico, podendo haver uma variância inicial da curva obtida. O efeito pepita (*nugget effect*) é a estimativa de semivariância para a distância nula, representado pelo valor da intersecção da curva com o eixo y . Indica, como sugere o nome, a ocorrência de alterações abruptas ao longo da superfície de variação do dado analisado. Corresponde à parte da variabilidade não explicada pela distribuição espacial dos dados, advinda de erros de medições, distância entre amostras ou ainda à característica de variação intrínseca do dado (microrrelevo). Portanto, dados com efeito pepita grande (em relação ao patamar atingido) indicam pequena dependência espacial e requerem maior cuidado para sua espacialização e conseqüente mapeamento (VALERIANO e SANTOS, 2002).

A altura do patamar (variância total) corresponde ao efeito pepita somado à variabilidade espacial. À variabilidade espacial estão associadas as expressões *sill* (sela) e *scale* (escala), conforme o programa. Usaremos aqui a expressão *escala*, para manter uniformidade com publicações anteriores. O semivariograma pode ser *escalonado* em relação à variância máxima dos dados, de modo que o patamar esteja posicionado em torno do valor 1,0 no eixo y . O escalonamento (*standardized semivariogram*) favorece a comparação entre semivariogramas de variáveis com diferentes ordens de grandeza.

Um detalhe a favorecer a obtenção de semivariogramas experimentais bem ajustados a modelos teóricos clássicos (com patamar: exponenciais, gaussianos e esféricos) é a remoção da tendência (VALERIANO, 2002). A remoção da tendência dos dados é necessária para atender à premissa de estacionaridade, ou geoestacionaridade, em geoestatística, que requer que as características estatísticas sejam constantes por toda a área analisada. Por exemplo, se dados topográficos forem tomados em uma única vertente, uma média móvel ao longo da área estudada será, como regra, tanto maior quanto mais próxima ao topo. A análise de tendência é uma regressão de z em relação a x e y , cuja equação define um plano médio (z_t) que percorre a superfície do terreno com os menores desvios, de acordo com a variação da média local (não-estacionaridade). Subtraindo-se a tendência z_t da altitude, obtêm-se os valores de resíduo (z_r), que são fornecidos para a análise geoestatística. Dessa forma, a componente não estacionária da

altitude não afeta a semivariância, o que favorece a obtenção de semivariogramas com patamar (Figura 2.7). Para uma compreensão mais aprofundada da geoestatística e da krigagem, sugere-se a leitura de Isaaks e Srivastava (1989) e Landim (2003).

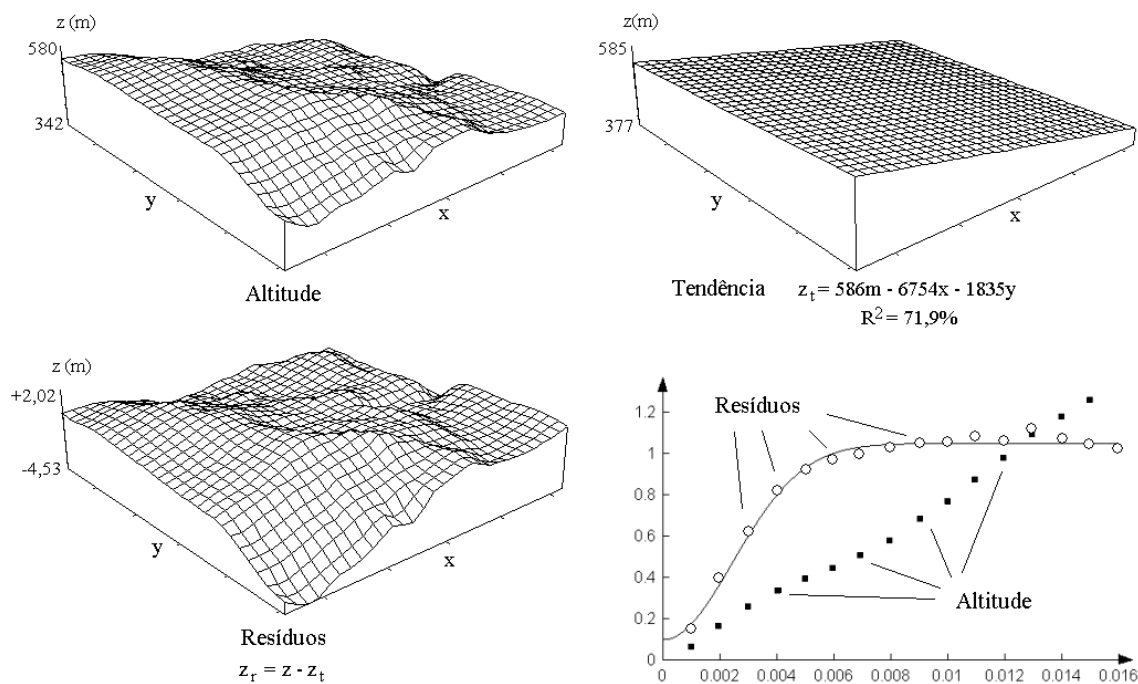


Figura 2.7 – Remoção da tendência para análise geoestatística dos resíduos.

Algumas características do conjunto amostral podem estar relacionadas ao semivariograma produzido, como tendências gerais:

- ocorrência de variações abruptas entre amostras próximas tendem a elevar o efeito pepita;
- o alcance está diretamente relacionado às dimensões da área de distribuição das amostras;
- dados de superfícies suaves, que apresentam continuidade na escala relativa da amostragem, favorecem a ocorrência de semivariogramas gaussianos.

Pelo outro lado do fluxo de pré-processamento, o semivariograma tem influência sobre as características da superfície interpolada. Além das evidências relatadas, há em trabalhos recentes tentativas específicas de associar os resultados geoestatísticos às características do MDE formado (GROHMANN e STEINER, 2008). Uma vez definido o modelo teórico de variabilidade espacial, com os respectivos coeficientes

geoestatísticos, estes são fornecidos no momento da krigagem, compondo, juntamente com o conjunto total de amostras (x,y,z) , as entradas para este cálculo. Os dados geoestatísticos são computados nas equações que transformam o modelo teórico ajustado em uma função que relaciona o peso da amostra à distância em relação ao ponto estimado. De modo grosseiro, podemos dizer que a distribuição dos pesos seguirá uma curva semelhante ao semivariograma virado de cabeça para baixo. Embora seja difícil prever as características que cada semivariograma causa no MDE, tal simplificação permite que alguns os efeitos sejam antecipados, ao menos comparativamente:

- as magnitudes do efeito pepita e do alcance estão diretamente relacionadas à suavização de feições de alta frequência (detalhadas);
- o efeito suavizador de grandes alcances é relativamente reduzido quando a pepita é nula ou desprezível;
- a inclinação inicial (quando $h=0$) do semivariograma indica a capacidade de manutenção de feições de alta frequência (rugosidade). O que equivale dizer que modelos gaussianos tendem a apresentar suavização dessas feições, quando comparados ao efeito de modelos exponenciais e esféricos.

Tais propriedades são corroboradas por observações nos experimentos desenvolvidos no escopo do TOPODATA, porém a ação conjunta dos dados do semivariograma, em interação com as características dos dados de entrada, mostrou-se complexa demais para que a seleção de coeficientes geoestatísticos, a serem amplamente aplicados, pudesse ser norteada por esta abordagem.

3 DESENVOLVIMENTO

Na perspectiva de uma preparação dos dados em cobertura nacional, os estudos preliminares (VALERIANO, 2004) indicaram uma possível conveniência de se realizarem preparos distintos para diferentes ambientes topográficos. Tal sugestão veio dos primeiros projetos acompanhados do uso de dados SRTM, esparsos, sobre a variabilidade espacial de dados SRTM em diferentes domínios, reforçada por diferenças geomorfológicas aliadas às diferentes finalidades destes estudos.

Como visto na fundamentação, na interpolação por krigagem, as estimativas são feitas com a ponderação das amostras em função do alcance, da escala e do efeito pepita do semivariograma. Uma vez que o semivariograma é estimado a partir de um conjunto de amostras, é razoável pressupor a associação das características dos elementos encadeados no fluxo: relevo-amostra-semivariograma-krigagem. Nessa hipótese, as características geomorfológicas estariam diretamente ligadas às propriedades da krigagem, estabelecidas pela análise de amostras respectivas àquele relevo.

Algumas observações foram cruciais para o abandono destas pressuposições iniciais: amostras de um mesmo tipo de relevo resultaram em semivariogramas diferentes, enquanto amostras em relevos geomorfolologicamente distintos resultaram em semivariogramas parecidos (Figura 3.1). Por fim, muitas vezes a interpolação mais interessante para um local foi obtida com coeficientes geoestatísticos obtidos em outro local. Com a ampliação dos testes, as observações tornaram claro que a escala de análise das amostras é incompativelmente detalhada em relação à escala das observações pelas quais se fazem as classificações de relevo. Além disso, o processamento posterior ao pré-processamento teria que ser desdobrado para otimizar seu desempenho sobre MDE de diferentes características, o que traria sérios comprometimentos à sua operacionalização e ao seu desempenho. Parte de tais experimentações, relatada a seguir, convergiram para a estratégia finalmente adotada na unificação do pré-processamento sob um único conjunto de coeficientes geoestatísticos.

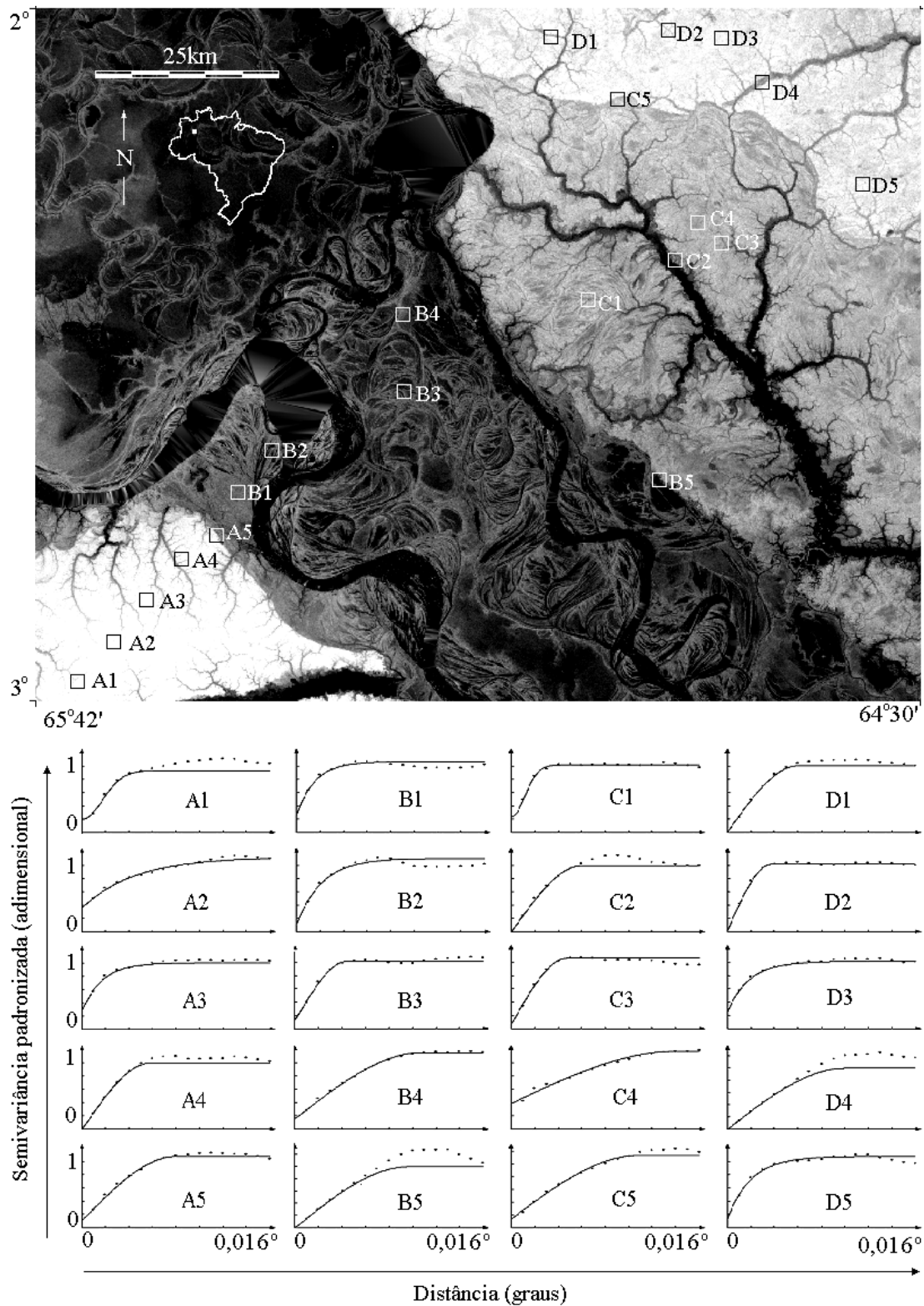


Figura 3.1 – Dissociação entre compartimentos de relevo e variabilidade espacial dos dados.

3.1 Testes localizados por projetos

O atendimento a projetos diversos levou à preparação de diferentes conjuntos de dados SRTM. A cada demanda apresentada, os processos de amostragem, análises geoestatísticas e krigagem foram retomados na região de estudo, em busca de MDE refinados que favorecessem o levantamento das informações de interesse nas condições do relevo das respectivas áreas de estudo.

Os dados SRTM foram amostrados em pequenos excertos de 30×30 *pixels*, de modo a se produzirem 900 pontos por amostra. A determinação de se analisarem pedaços contíguos do MDE SRTM vem da finalidade específica da interpolação, que é um refinamento. Se fossem tomados pontos esparsos, teríamos uma caracterização mais abrangente em termos de área, porém os alcances seriam condicionados pela variabilidade total da amostra, que seria atingida a distâncias maiores do que na forma praticada. Além disso, seriam menores as chances de se observar a variabilidade entre amostras mais próximas, um dado crucial para o refinamento. Após os primeiros atendimentos, a metodologia de seleção passou a seguir o fluxo descrito na Figura 3.2.

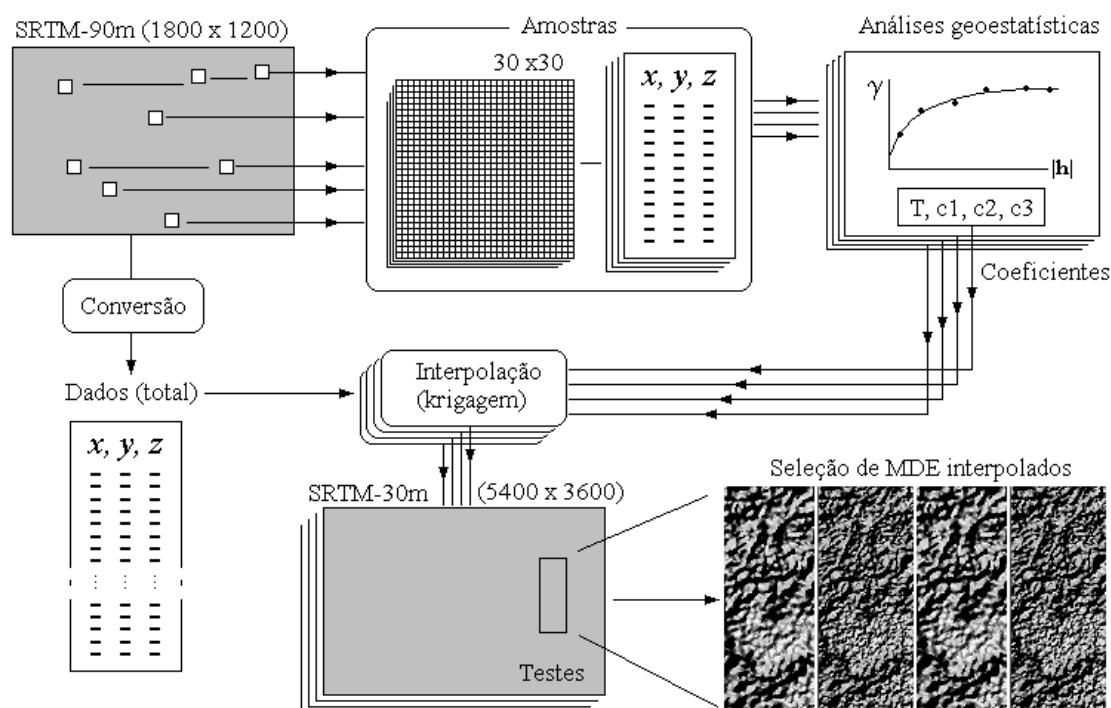


Figura 3.2 – Seleção de coeficientes geoestatísticos para interpolação. Fonte: adaptado de Valeriano e Abdon, 2007.

Diante de uma área de interesse, o modo de se ter uma maior abrangência das análises foi a repetição da amostragem em várias porções da mesma. À medida que prosseguiram os estudos locais, os processos foram paulatinamente operacionalizados, de modo que a sua repetição se tornasse cada vez mais facilitada. Na marcha definitiva, foram tomados 8 amostras 30x30 em cada folha 1:250.000 de cada área de estudo. Previamente à tomada das amostras, as folhas foram examinadas para a identificação de localidades com padrões distintos da superfície, para compor um conjunto mais diversificado possível. Assim, foram apontadas áreas de planos, vertentes, drenagem, feições convexas, feições côncavas, enfim, toda variação que trouxesse potenciais diferenças entre os semivariogramas (Figura 3.2).

Ao fim desta coleta, as análises geoestatísticas seguiram com grandes conjuntos de amostras, cuja marcha de análise foi automatizada em praticamente todas as etapas, exceto na criação de semivariogramas experimentais e no ajuste de modelos teóricos. Ajustados os semivariogramas (escalonados), estes foram editados em escala padronizada para comparação visual (exemplo em Valeriano, 2004, Figuras 4.7 e 4.8), com vistas a agrupar os tipos principais, de acordo com sua semelhança. De cada grupo homogêneo, foi selecionado um representante típico para os testes de interpolação. Nesta etapa, áreas que reunissem feições diversificadas foram escolhidas para testar krigagens respectivas a todos os tipos de semivariogramas selecionados (Figura 3.3).

Os MDE assim interpolados foram então avaliados com base na visualização das imagens pelos usuários finais sob diferentes esquemas de apresentação (relevo sombreado, transectos e perspectivas) e em diferentes escalas. Embora a observação de feições de relevo em registros fotográficos tenha sido bem explorada em testes iniciais, tal prática depende da existência e do acesso a estas fotos, o que não garante ainda o controle posicional das mesmas. Assim, estas comparações tiveram que se ater aos padrões observados em feições notáveis e de geometria facilmente registrada, em vez de se relacionarem feições isoladas e de localização restrita. No exemplo do Monte Roraima, RR (Figura 3.4), observa-se que o MDE, já nos dados originais, não caracteriza suas escarpas como verticais, apesar de suas grandes dimensões, o que sugere uma limitação dada pelo espaçamento desde a aquisição dos dados SRTM.

Embora um ou outro modelo se mostrasse mais aderido ao perfil observado, nenhum tratamento mostrou superar esta limitação intrínseca.

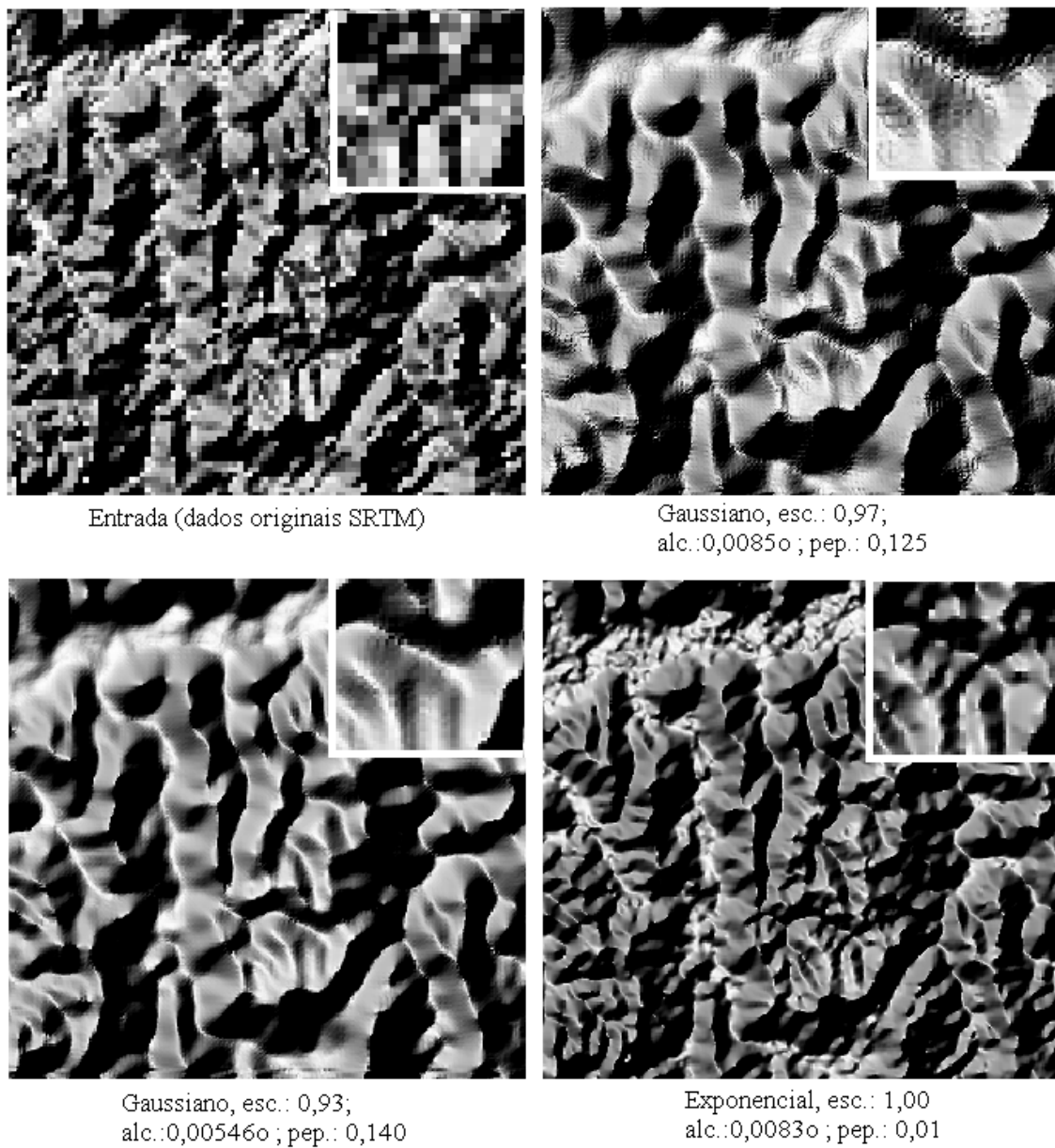


Figura 3.3 – Teste de krigagem com diferentes semivariogramas (Codó, MA).

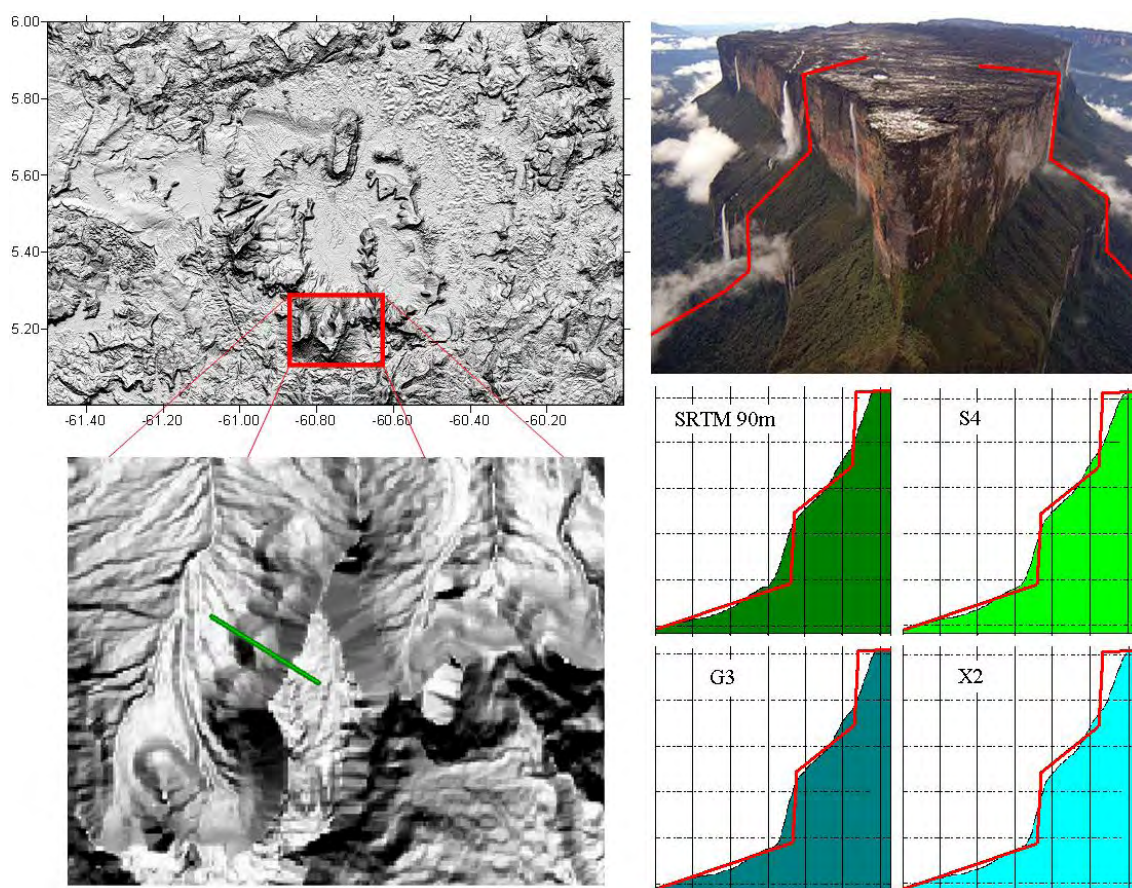


Figura 3.4 – Exemplo de teste de transectos sobre fotografia, no Monte Roraima. Foto: Bruce Means (<http://www.climbing.com/news/hotflashes/cuttingtheline/>)

A observação de feições menores pela mesma modalidade, igualmente pautada em padrões, mostra-se relativamente mais afetada pelo efeito dossel, em proporção às suas dimensões. Na Figura 3.5, por exemplo, observam-se perfis longitudinais e transversais dos diques marginais na região de Mamirauá, AM, em que dificilmente se dissociam variações do relevo e o efeito dossel, dada sua co-ocorrência no espaço. No teste apresentado, estão evidenciados diferentes graus de suavização dados por dois modelos teóricos (SF1 e EXP) ajustados a um mesmo semivariograma experimental.

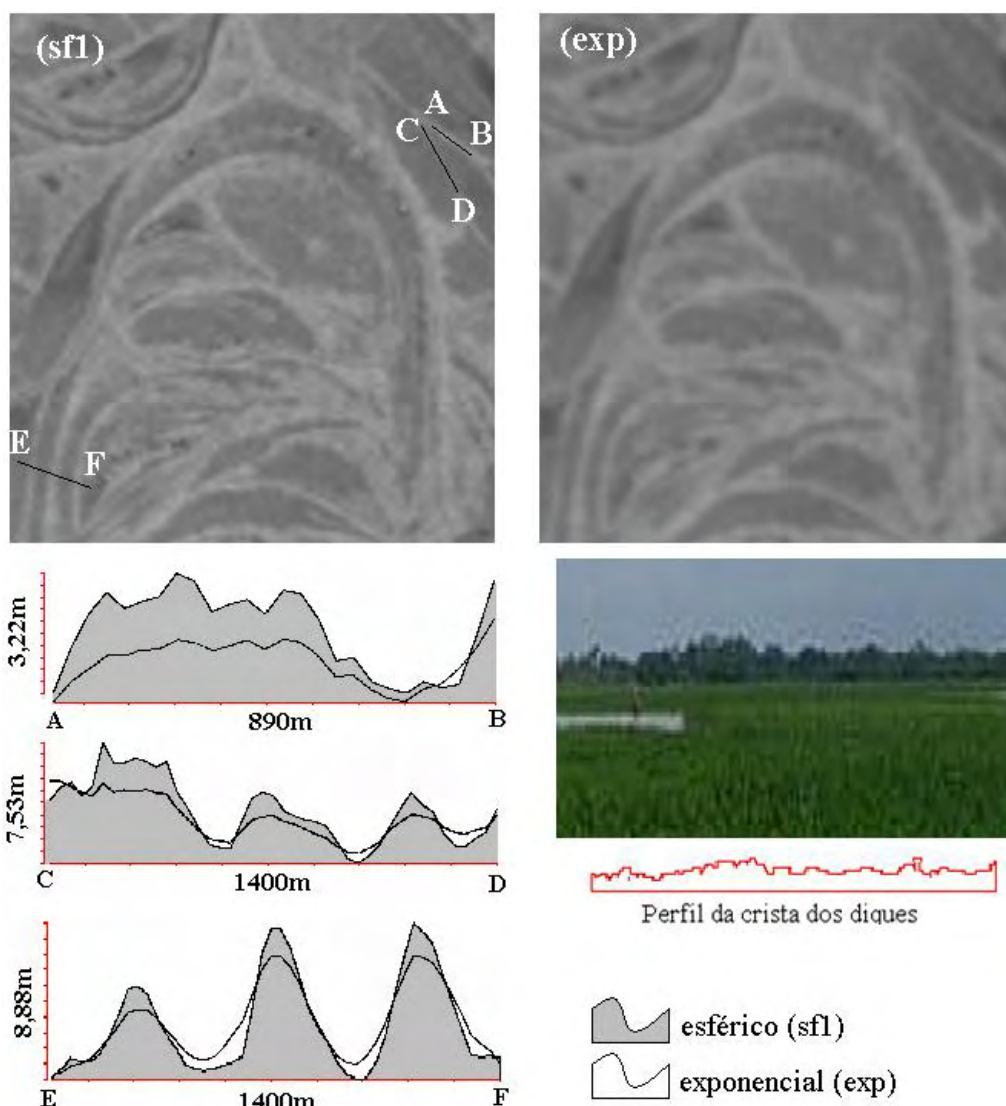


Figura 3.5 – Exemplo de teste de transectos sobre fotografia, em Mamirauá. Foto: Andreia Maria da Silva França (cortesia).

Este tipo de teste trouxe informações importantes do ponto de vista de decisões a serem tomadas diante de limitações da capacidade informativa dos dados SRTM, porém mostrou-se pouco eficaz para a escolha dos modelos de interpolação em si, dada sua expressão pontual e restrita. O aporte majoritário de fundamentação experimental específica para a seleção de modelos foi dado pelo estudo de relevos sombreados. Embora se possa questionar a ausência de controles experimentais nestes testes, a familiaridade com as formas naturais de ambientes diversos, inerente aos intérpretes consultados, mostrou-se suficiente para a indicação dos modelos de maior capacidade

de representação do relevo. Identificados os melhores resultados, os respectivos coeficientes foram aplicados em todas as folhas que compõem cada área de estudo, independentemente da folha que deu origem a este conjunto, de forma a se obter um MDE padronizado para toda a área. Essa forma de trabalho foi seguida até que cerca de 35% do território nacional estiveram preparados sob diferentes interpolações (Figura 3.6).

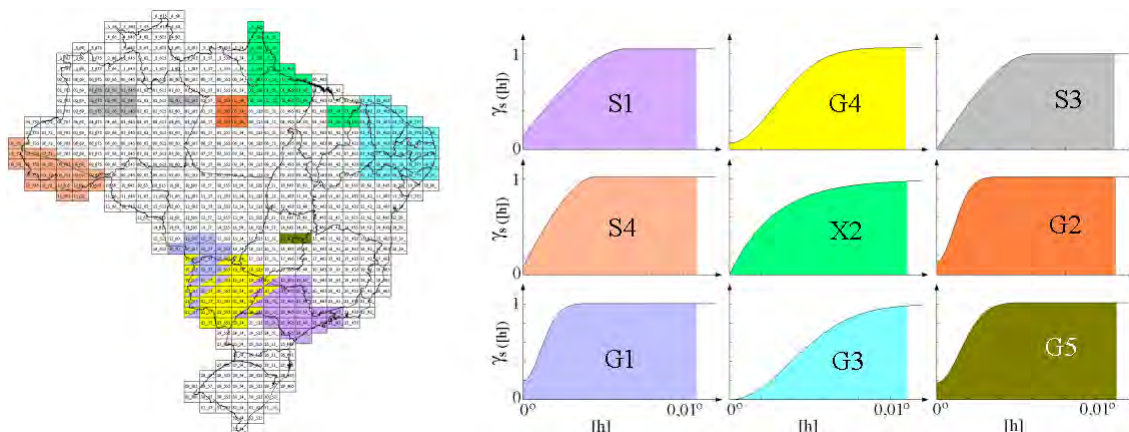


Figura 3.6 – Semivariogramas selecionados nas diferentes áreas de estudo.

Os coeficientes correspondentes aos semivariogramas selecionados para aplicação nas áreas estudadas estão apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Coeficientes de semivariogramas selecionados para diferentes áreas de estudo.

Modelo	Tipo	Escala (m ² /m ²)	Alcance (°)	Pepita
S1	esférico	0,9125	0,00655	0,145
S4	esférico	0,9400	0,0046	0,090
G1	Gaussiano	0,8100	0,0027	0,200
G4	Gaussiano	1,0000	0,0069	0,070
X2	exponencial	1,0000	0,0083	0,001
G3	Gaussiano	1,0000	0,0093	0,000
S3	esférico	1,0000	0,0060	0,003
G2	Gaussiano	0,8900	0,0026	0,140
G5	Gaussiano	0,8400	0,0036	0,180

Pelo teste de refinamento com o modelo Delta de Dirac, análogo ao ilustrado na Figura 2.3, a aplicação dos coeficientes geoestatísticos selecionados em krigagens para as diferentes áreas de estudo mostrou expressivas diferenças de efeito, o que ressalta o

caráter flexível da krigagem (Figura 3.7). Os cones de distribuição do peso mostram diferentes formatos, numa indicação de variados efeitos de suavização e generalização.

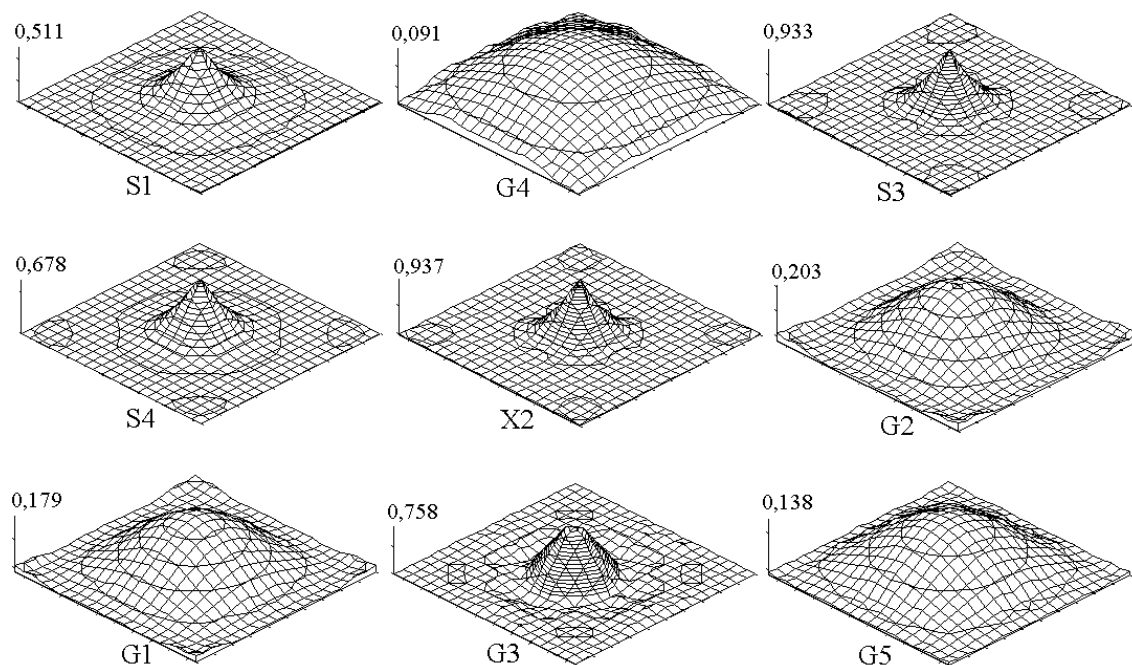


Figura 3.7 – Pesos dos semivariogramas da Figura 3.6 distribuídos em quadrado de 600m.

Embora obtidos sob metodologia padronizada, os conjuntos de coeficientes geoestatísticos destas áreas foram selecionados mediante avaliação visual de diferentes intérpretes e condicionada pelos interesses particulares de cada projeto. Essa é a principal fonte de diferenças entre os semivariogramas selecionados, embora houvesse casos em que os resultados geoestatísticos se mostraram consistentemente regionalizados em padrões restritos.

Quando aplicadas no mesmo segmento (7x7) de MDE usado no exemplo da Figura 2.4, as diferenças dadas por estes fatores resultam em características distintas das superfícies produzidas, conforme os relevos sombreados apresentados na Figura 3.8. No terreno usado para este teste, localizado no Estado do Acre, alguns modelos mostram-se extremamente suavizados, ocasionalmente com ruídos em padrão reticulado. O teste do modelo S4, cujos coeficientes advêm de amostras selecionadas do mesmo Estado e em terreno semelhante, mostra-se livre destes efeitos. Os resultados indesejáveis decorreram da divergência das características levadas em conta na seleção de cada

modelo em relação ao terreno testado. Os critérios que foram adotados para escolha destes modelos podem ser contrapostos em dois grupos: quando se desejou eliminar detalhes, efeito dossel e eventuais ruídos, buscaram-se modelos que promovessem suavização; quando interessou a observação de feições de alta frequência espacial, padrões de rugosidade e outras informações detalhadas, foram selecionados modelos que preservassem estas variações. Observa-se que os modelos S3, X2 e G3 resultaram em maior detalhamento do que o próprio modelo S4, que foi originado na área exemplificada (Figura 3.8).

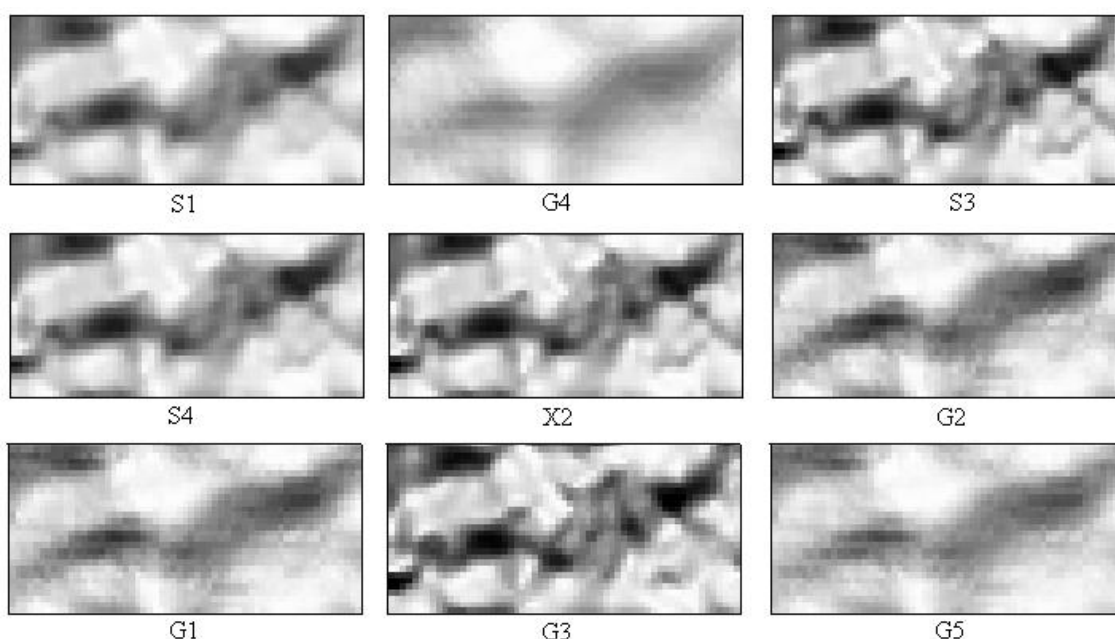


Figura 3.8 – Relevos sombreados das superfícies produzidas por diferentes krigagens.

Cabem algumas considerações a respeito destas experiências com amostragens, análises geoestatísticas e o modelo de elevação produzido, além das impressões transmitidas pelos usuários. O retorno do usuário, preconizado na concepção inicial deste projeto (veja em Valeriano, 2004, página 62, Figura 4.20), trouxe elementos importantes para complementar a avaliação dos resultados experimentados, contribuindo de fato para o estabelecimento da metodologia. Entre essas, podemos destacar:

- Há como produzir com os mesmos dados de entrada MDE com diferentes graus de detalhamento/suavização de acordo com os coeficientes geoestatísticos aplicados.

- A perspectiva de se atenuarem os efeitos de objetos não-topográficos não pode ser atendida sem um comprometimento sensível do detalhamento oferecido pelos dados.
- Modelos produzidos com detalhamento podem ser suavizados de diversas formas. A recíproca não é possível.

Uma decisão quanto às características de um MDE unificado para todo território nacional deve atender a demanda de maior exigência possível. Assim, o critério para a seleção do modelo foi dirigido à obtenção do máximo detalhamento que não produzisse ruídos não-topográficos. A busca de tal condição, diante dos elementos listados acima, justificou a suposição de que algum dos modelos já selecionados em função de seu poder de detalhamento pudesse ter um desempenho desejável sobre uma ampla gama de situações topográficas. Da observação das aplicações testadas até então, restaram os modelos X2, S4 e G3 como os mais promissores a apresentarem tal desempenho. Os modelos S1 e S3 parecem promissores no teste da Figura 3.8, porém exames detalhados em sua própria área de origem revelaram efeitos moderados de suavização (S1) e de geração de ruídos (S3). Os demais modelos haviam sido selecionados sem que houvesse preocupação com o detalhamento, em função da escala e dos objetivos destes projetos.

3.2 Seleção de áreas para testes

A seleção do conjunto de segmentos do MDE de dados SRTM para os testes de avaliação dos modelos de interpolação (Figura 3.9 e Tabela 3.2) foi planejada com vistas a maximizar a representatividade do experimento nas diferentes situações topográficas possíveis. Para um possível atendimento desta condição previamente aos testes, foram adotados inicialmente critérios de distribuição geográfica, em diferentes regiões do Brasil, e observadas áreas em que se esperam condições distintas de relevo. Representações generalizadas do relevo sombreado foram examinadas para a localização de quadriculas da articulação 1:250.000 que constituíssem conjuntamente a maior diversidade de condições. Esta etapa mostrou-se especialmente facilitada com uso dos recursos do programa da EMBRAPA “Brasil em relevo” (MIRANDA, 2005). Em cada folha foram realizados exames em detalhamento progressivo, para identificação de características de interesse do MDE que pudessem ser afetadas pelo refinamento.

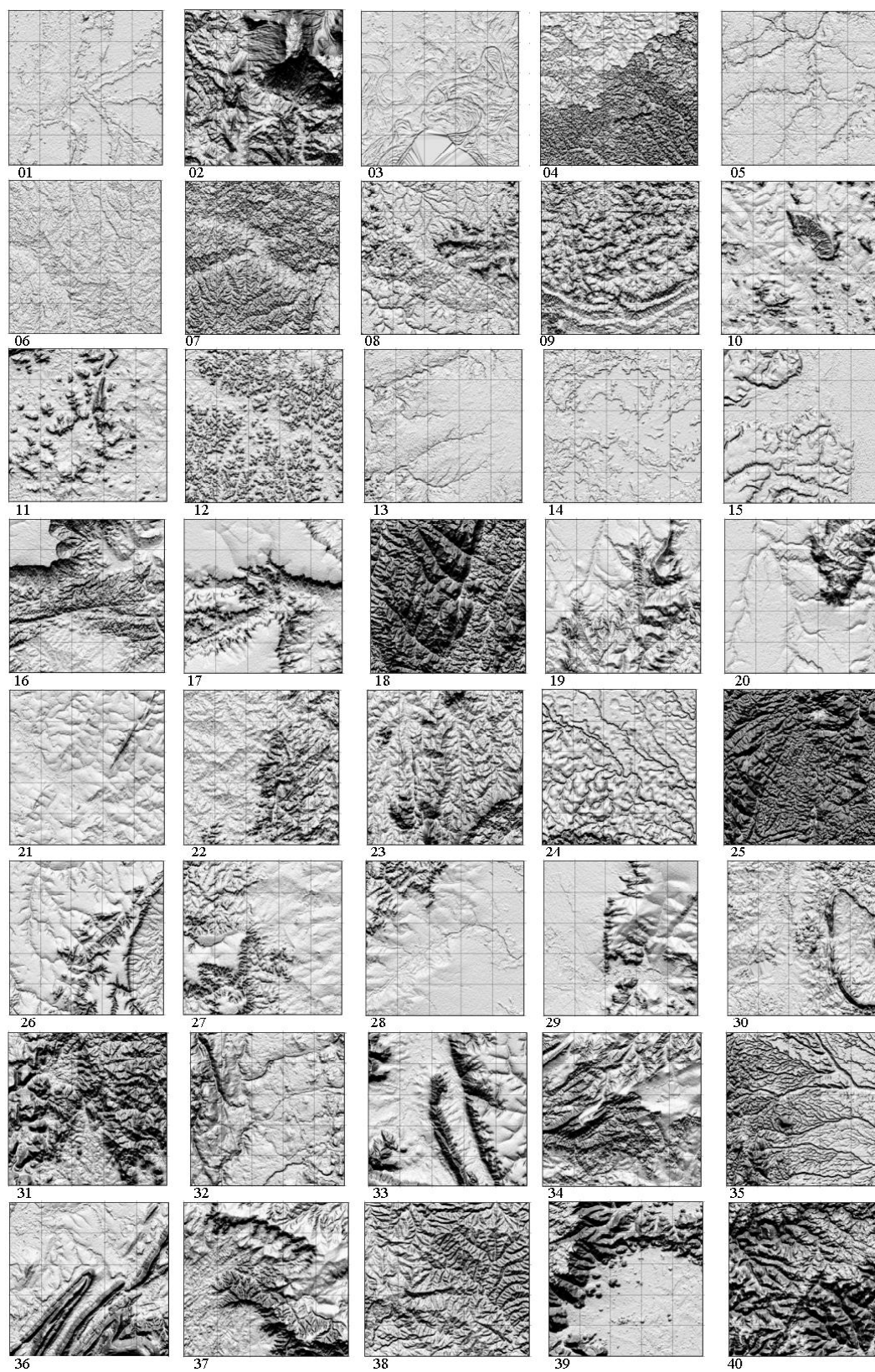


Figura 3.9 – Relevo sombreado das áreas testadas.

Tabela 3.2 – Áreas selecionadas para testes

No.	Estado	Folha	¹ PLE	x min (°)	x max (°)	y min (°)	y max (°)	z min (m)	z max (m)
01	RR	2_615	1	-61	-60,75	+1	+1,25	34	106
02	RR	6_615	1	-61	-60,75	+5	+5,25	841	2461
03	AM	02_66	1	-65,5	-65,25	-2,5	-2,25	7	68
04	PA	03_57	1	-55,75	-55,5	-3,75	-3,5	18	242
05	AM	05_63	1	-62	-61,75	-5,5	-5,25	22	75
06	AM	05_72	1	-71,75	-71,5	-5,25	-5	84	192
07	AC	10_69	1	-68,75	-68,5	-10,75	-10,5	160	292
08	AM	08_60	2	-59,75	-59,5	-8,5	-8,25	54	325
09	AM	08_60	2	-59,25	-59	-8,5	-8,25	140	373
10	PA	09_54	2	-53	-52,75	-9,5	-9,25	272	542
11	MT	09_54	2	-52,75	-52,5	-10	-9,75	246	507
12	MA	03_45	3	-43,75	-43,5	-3,75	-3,5	15	108
13	MA	03_45	3	-44	-43,75	-3,25	-3	4	117
14	PA	01_495	1/3	-49,5	-49,25	-1,5	-1,25	1	37
15	PB	07_36	4	-35	-34,75	-7,25	-7	1	109
16	PE	07_405	4	-39,25	-39	-7,75	-7,5	388	978
17	TO/BA	12_465	5	-45,25	-45	-12,25	-12	438	755
18	BA	14_405	5	-40,25	-40	-14,75	-14,5	282	1181
19	MG	17_465	5	-46,25	-46	-17,75	-17,5	520	885
20	MG	17_465	5	-46,25	-46	-17,5	-17,25	508	893
21	GO	14_51	6	-50,5	-50,25	-14,25	-14	239	444
22	GO	14_51	6	-50,25	-50	-14,75	-14,5	285	656
23	GO	16_51	6	-50,75	-50,5	-16,25	-16	357	930
24	BA	17_405	7	-40,25	-40	-17,75	-17,5	79	461
25	ES	20_42	7	-41,25	-41	-20,25	-20	275	1281
26	PI	10_45	3/5	-44,5	-44,25	-10,5	-10,25	359	726
27	MT	11_525	2/6	-51,5	-51,25	-12	-11,75	218	462
28	MT	13_525	6/2	-51,75	-51,5	-13,5	-13,25	229	423
29	MS	18_555	8	-55	-54,75	-18,5	-18,25	153	467
30	PA/TO	06_495	6/3	-48,75	-48,5	-6,75	-6,5	101	437
31	BA	12_42	6/5	-41	-40,75	-13	-12,75	288	844
32	BA	12_42	6/5	-41,25	-41	-12,5	-12,25	361	872
33	GO	14_48	6/5	-46,75	-46,5	-15	-14,75	490	1034
34	GO	14_48	6/5	-48	-47,75	-15	-14,75	719	1324
35	BA	16_405	5/7	-39,5	-39,25	-17	-16,75	1	540
36	MT	15_57	6/8	-57	-56,75	-15,25	-15	156	882
37	MT	15_57	8/6	-56	-55,75	-15,5	-15,25	174	861
38	PR	25_51	8/7	-50,5	-50,25	-25,75	-25,5	770	1022
39	SC	29_51	7/8	-50	-49,75	-29,25	-29	1	1139
40	RS	29_51	7/8	-51	-50,75	-29,5	-29,25	56	899

(1) Província litoestrutural: 1 – Amazônia Norte; 2 – Amazônia Sul; 3 – Parnaíba; 4 – Borborema; 5 - São Francisco; 6 – Tocantins; 7 – Mantiqueira; 8 - Paraná

Esta sistemática resultou na seleção das 40 áreas que estão apresentadas de forma padronizada na Figura 3.9, em relevo sombreado, com iluminação de Norte, a 60° de elevação, com exagero vertical de 12 vezes e em escala absoluta aproximada (relativa às dimensões do papel A4) de 1:1.000.000. Cada área corresponde a um segmento de 0,25° x 0,25° (Tabela 3.2), uma matriz de 300x300 *pixels* nos dados SRTM originais.

Em função de diferenças na diversidade e na ocorrência de feições de interesse, a distribuição das áreas testes cobriu as províncias lito-estruturais de maneira heterogênea (Figura 3.10). Ressalta-se, porém, que tal aspecto não foi considerado prejuízo ao atendimento das condições preconizadas e sim um reflexo da diversidade de relevo encontrada em cada província.

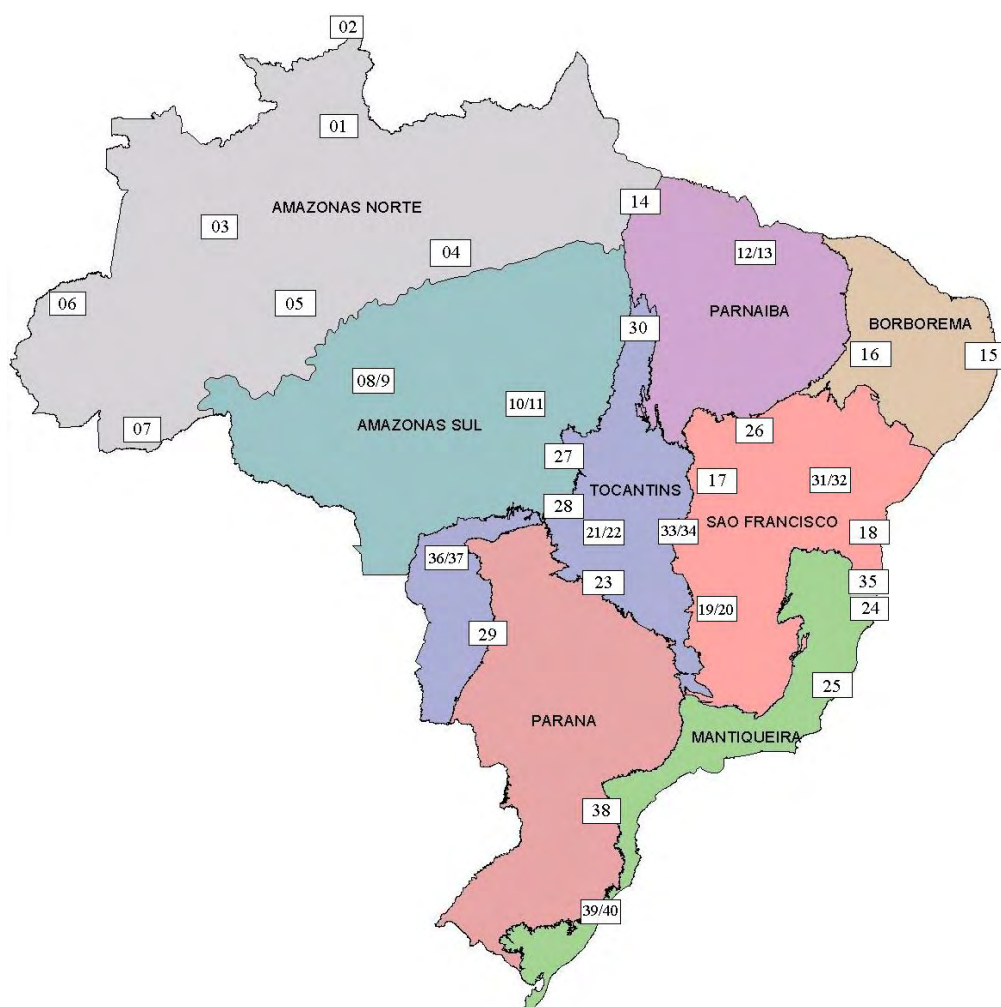


Figura 3.10 – Distribuição das áreas testes nas diferentes províncias litoestruturais (IBGE).

Nas Figuras 3.11 a 3.17, áreas seleccionadas estão representadas em relevo sombreado sob escala absoluta aproximada de 1:350.000. Estas figuras foram compostas numa progressão decrescente de relevo, partindo de terrenos montanhosos (Figura 3.11) até planos (Figura 3.17). Na Figura 3.11 A-D, apresentam-se relevos montanhosos, de grande amplitude altimétrica (de 800m a 1600m).

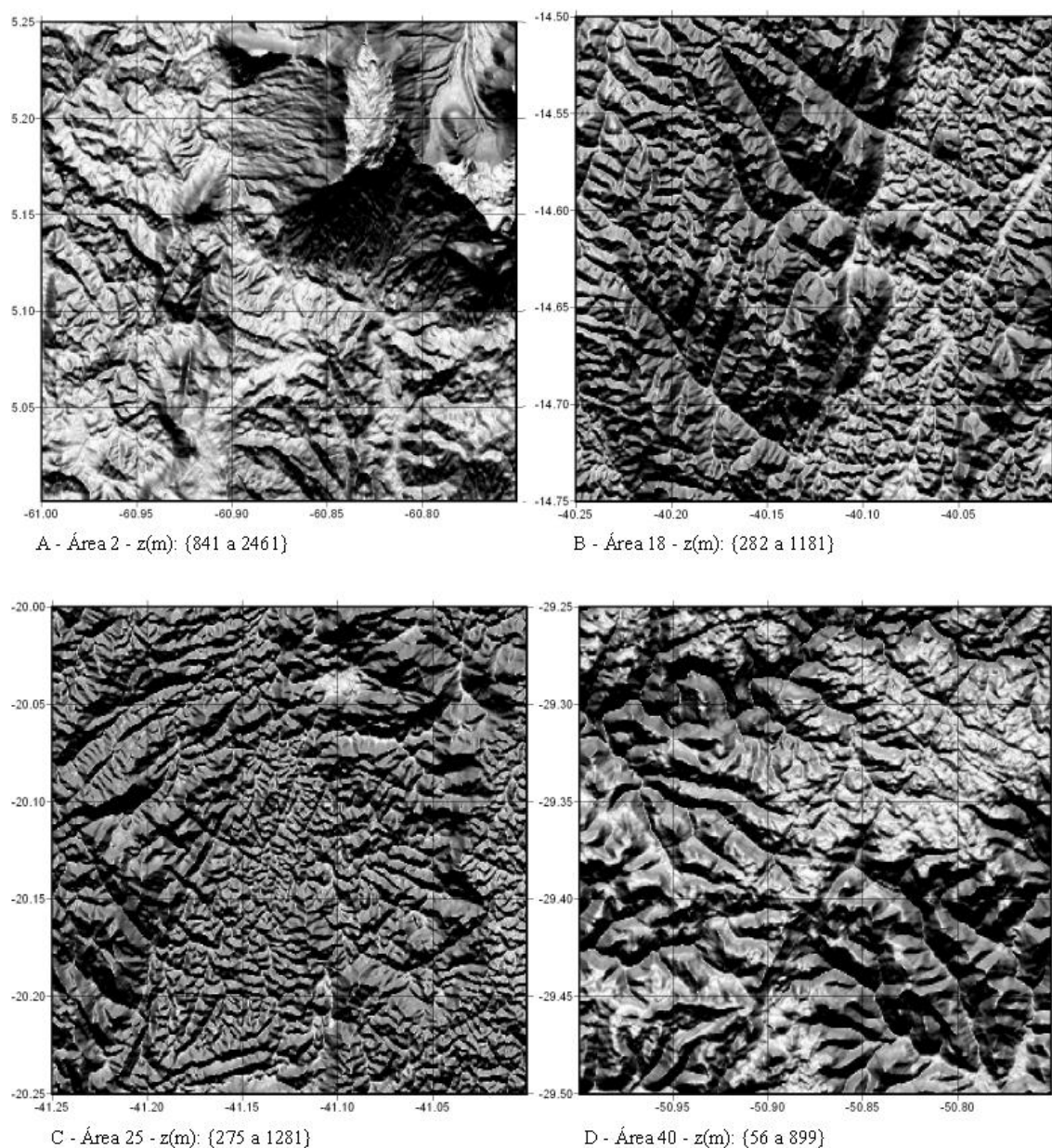


Figura 3.11 – Relevo das áreas de estudo 2 (A), 18 (B), 25 (C) e 40 (D).

São terrenos que refletem tipos litológicos distintos, com menor ou maior resistência à erosão, ou que são afetados por tectonismo, como ilustrado nas figuras 3.11B-D, onde o relevo é marcado por expressivos lineamentos morfoestruturais de direções predominantes NE-SW e NW-SE. Na representação em relevo sombreado, tais aspectos são ressaltados por forte contraste devido ao efeito de sombreamento. Embora tais terrenos ofereçam situações de alta declividade, são relativamente desprovidos de características cuja observação requeira a percepção detalhada de sua superfície. De modo geral, os elementos de textura são de grandes dimensões.

Os segmentos apresentados nas Figura 3.12 A-D também apresentam relevo montanhoso, sendo alguns também notavelmente resultantes de processos tectônicos, como por exemplo na Figura 3.12B, onde se observam fortes lineamentos morfoestruturais de direção NE-SW e, subordinadamente, NW-SE. Entretanto, relevos com grandes contrastes de amplitude podem resultar de processos erosivos, como ilustrado na figura 3.12C, onde rochas de idades relativamente mais antigas (a norte) foram desgastadas por erosão, o que criou espaço para acomodação de uma sucessão sedimentar de idade relativamente mais jovem (sul). Nestes casos, há grande variação de forma de transição, configuradas em feições que variam desde desníveis escarpados (como as arestas agudas da borda Sul da Chapada do Araripe, Figura 3.11-D) até diferenças sutis no padrão de textura. Independentemente da origem, a justaposição de terrenos com maior variação de amplitude vertical promove contraste entre os padrões de sombreamento. O interesse por tais terrenos advém da possibilidade de se investigar o desempenho dos interpoladores nas transições entre compartimentos, além da grande diversidade de padrões de relevo que tais áreas oferecem.

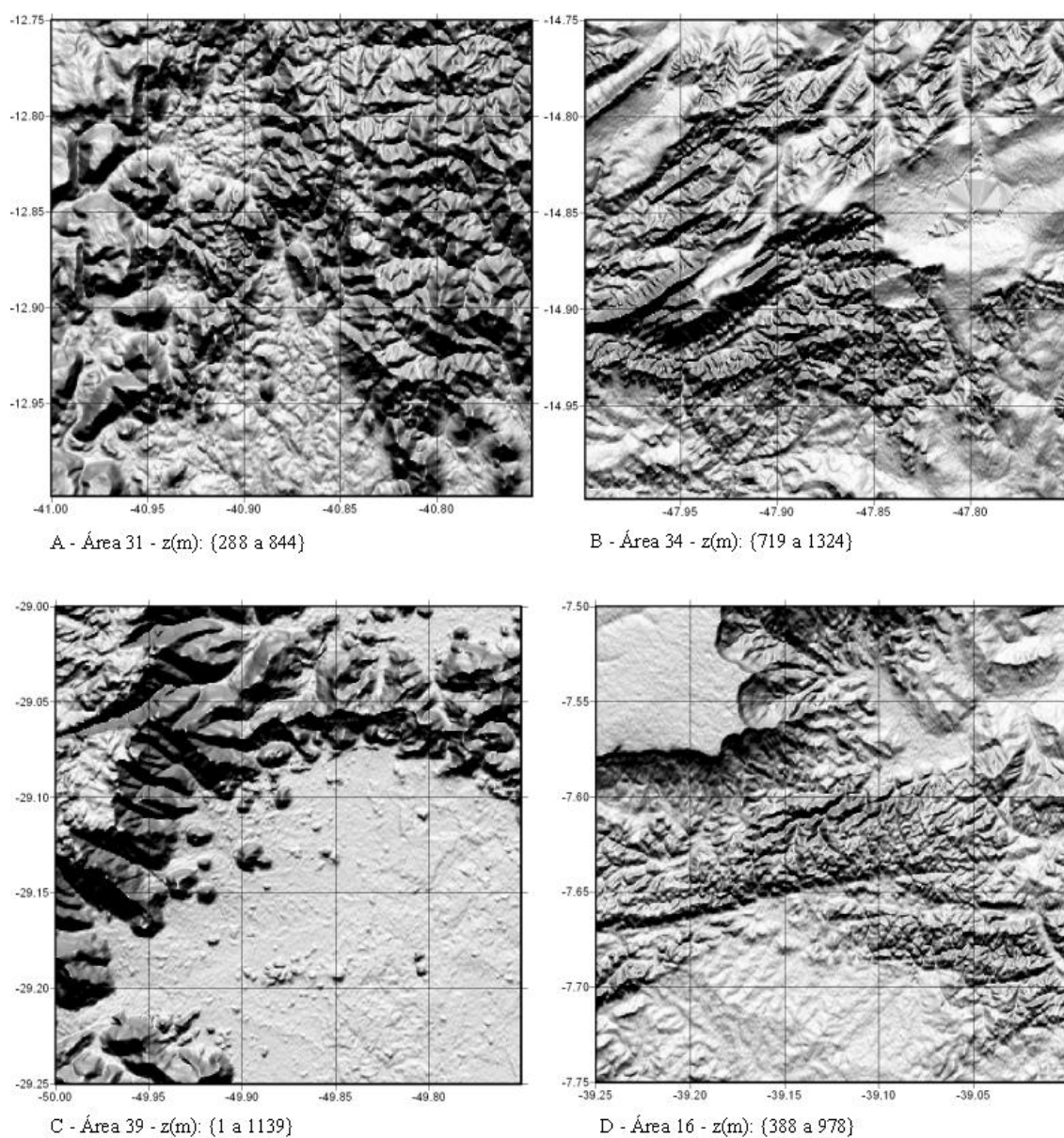


Figura 3.12 – Relevo das áreas de estudo 31 (A), 34 (B), 39 (C) e 16 (D).

Na Figura 3.13 A-D estão reunidas áreas que apresentam grande variação de características observadas na escala de vertentes (setas), evidenciadas particularmente em transectos longitudinais aos interflúvios, dentro de um mesmo estrato altimétrico. Os canais de drenagem e as cristas apresentam diversas configurações de seção transversal, de arredondados a agudos, muitas vezes intercalados em curtas distâncias. Essas características morfológicas, normalmente ofuscadas em áreas com contrastes altimétricos, merecem ser descritas porque potencialmente podem refletir substratos

e/ou processos geológicos distintos. Sua observação permite avaliar os possíveis efeitos da krigagem sobre a textura das superfícies planares e a manutenção de arestas e feições agudas presentes nas transições altimétricas, de modo simultâneo.

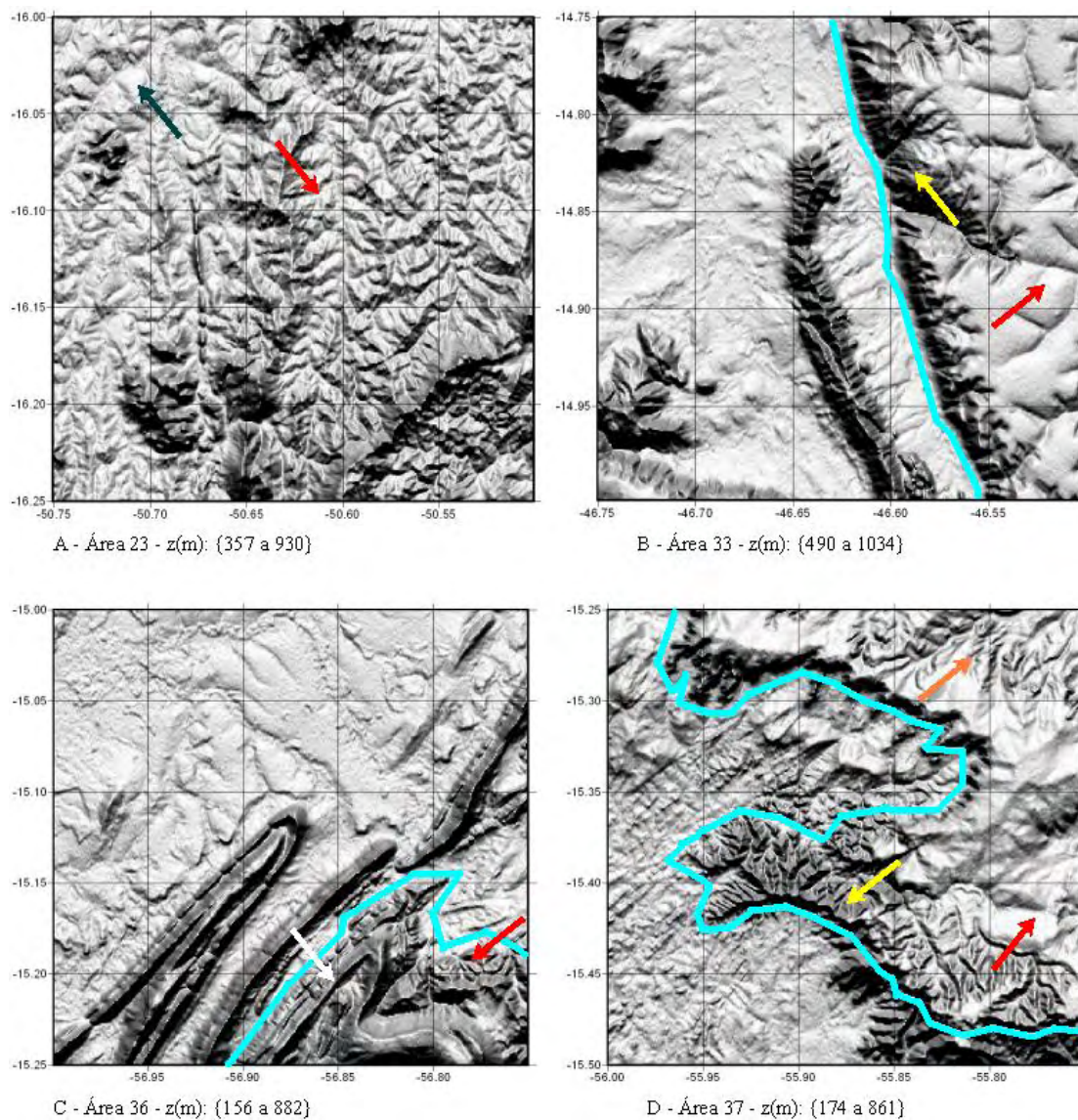


Figura 3.13 – Relevo das áreas de estudo 23 (A), 33 (B), 36 (C) e 37 (D).

As áreas representadas na Figura 3.14 A-D foram reunidas em função de texturas topográficas finas, relacionadas a áreas de alta densidade de drenagem, cujos detalhes diferenciais devem ser preservados. Estes padrões diferem-se por aspectos variados, sobretudo pela configuração da estrutura ramificada de pequenos segmentos de

drenagem e interflúvios curtos, feições importantes porém suficientemente delicadas para serem desfiguradas por processos de interpolação.

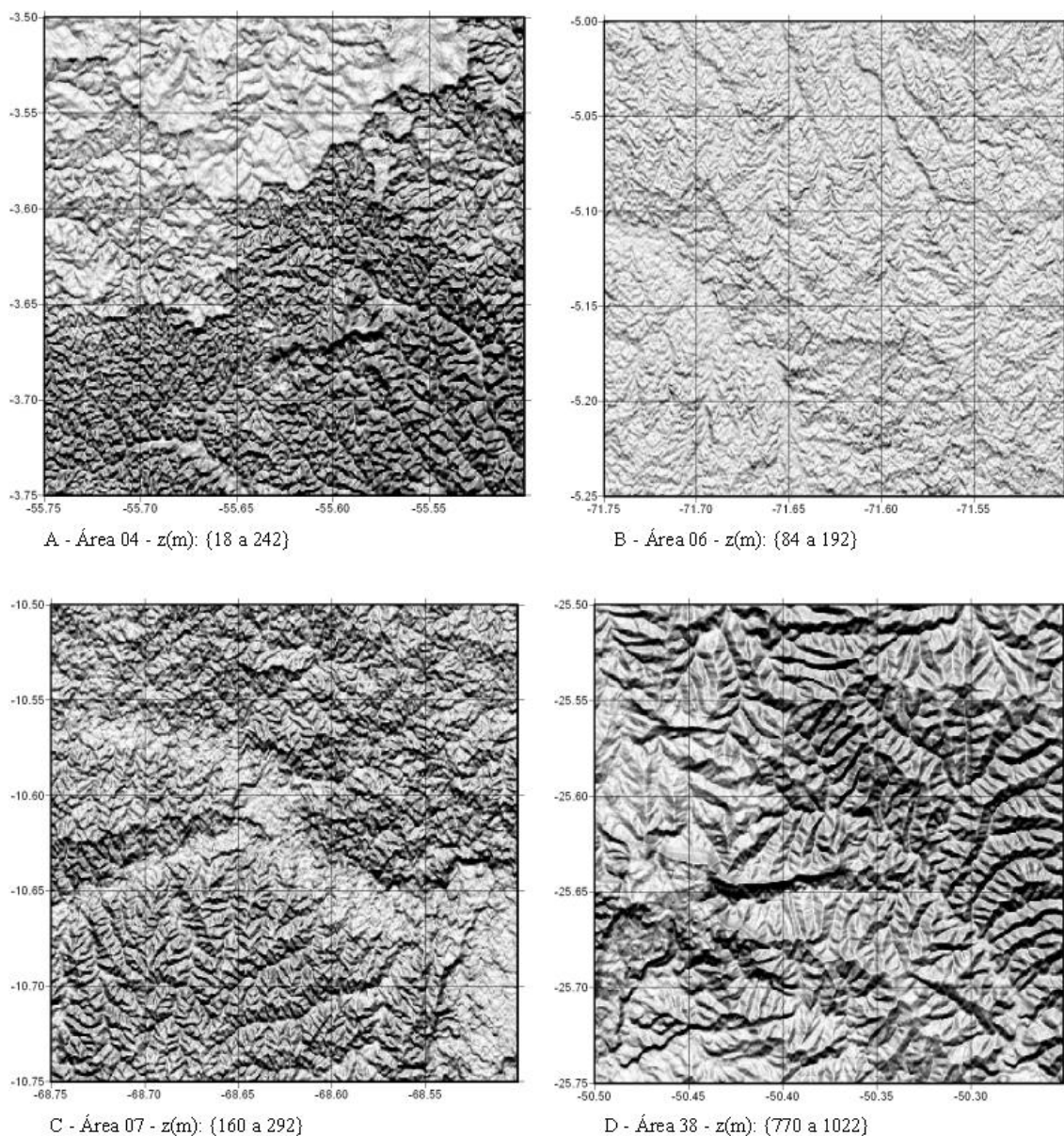


Figura 3.14 – Relevo das áreas de estudo 4 (A), 6 (B), 7 (C) e 38 (D).

Nas Figuras 3.15 A-D e 3.16 A-D estão representadas, respectivamente, áreas de terreno baixo-predominante e alto-predominante. Estes relevos se caracterizam pela presença de feições distribuídas em meio à predominância de uma determinada faixa de altitude. Considerando as distribuições de pesos para as estimativas nos diversos processos de interpolação (Figuras 2.3 e 3.7), esta situação permite observar o grau de preservação ou

diluição de cotas que se apresentam contrastantes em relação à sua vizinhança. Este efeito deve ser dosado para que tais feições não sejam desfiguradas em tentativas de se obter a diluição de artefatos nos dados SRTM com modelos mais suaves.

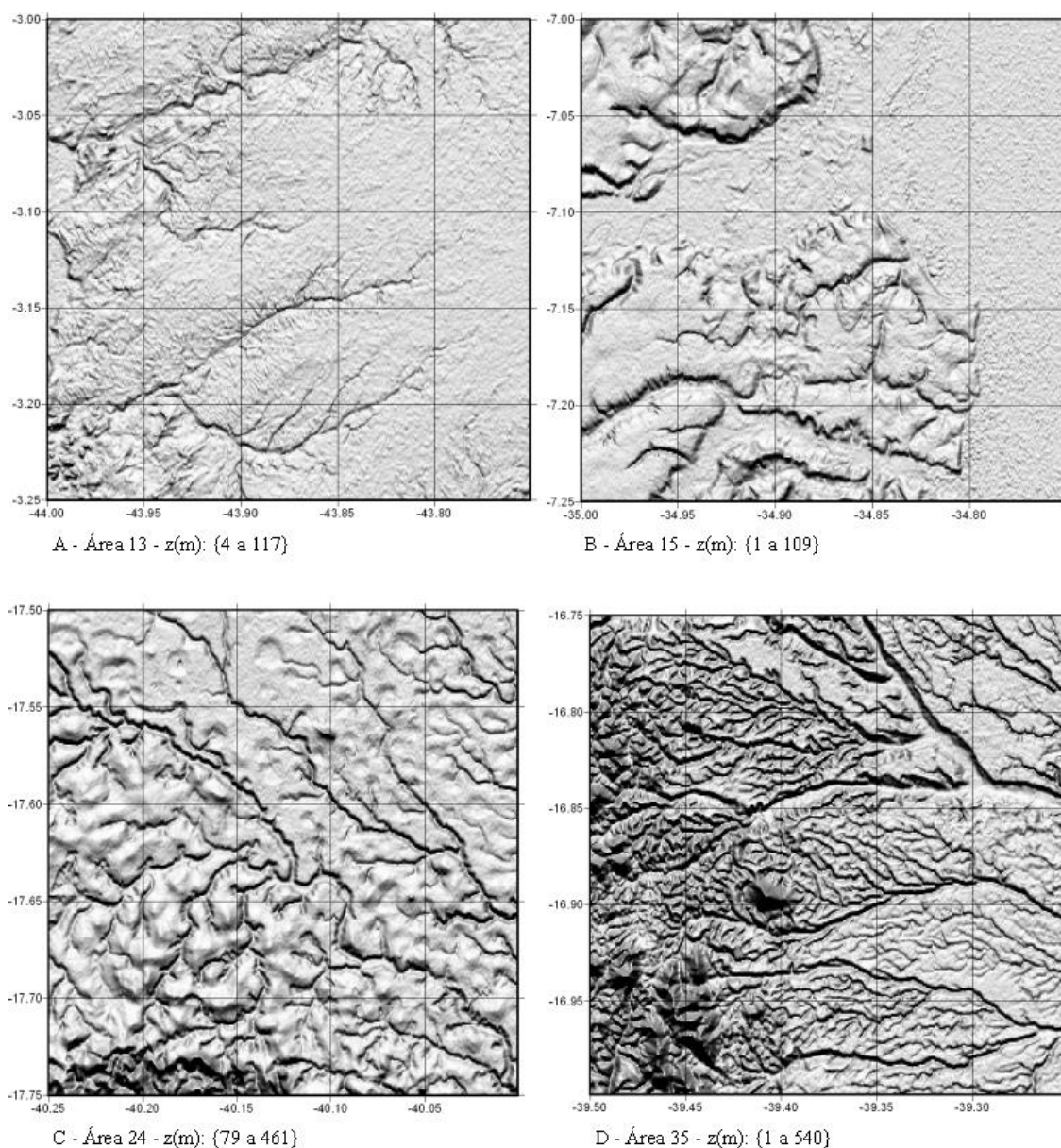


Figura 3.15 – Relevo das áreas de estudo 13 (A), 15 (B), 24 (C) e 35 (D).

Uma vez que os dados serão interpolados com a integração das cotas altimétricas vizinhas ao ponto estimado, esta condição permite avaliar o efeito do raio de busca na situação em que o ponto estimado tem grande contraste com seu entorno. Esta situação de relevo é a que mais se aproxima do relevo hipotético usado para os testes da Figura

2.3. No caso do alto predominante (Figura 3.15), a preocupação é a preservação do formato da seção transversal do canal de drenagem. Já no caso do baixo predominante, o objetivo é preservar feições que podem ter significados diversos no aspecto geológico, uma vez que a baixo-predominância pode destacar feições de origens variadas, como morros testemunhos, diques, vulcões etc. Distribuição menos pronunciada de baixo-predominância pode estar associada, por exemplo, a áreas sujeitas a processo de dissecação intensa (Figura 3.16D).

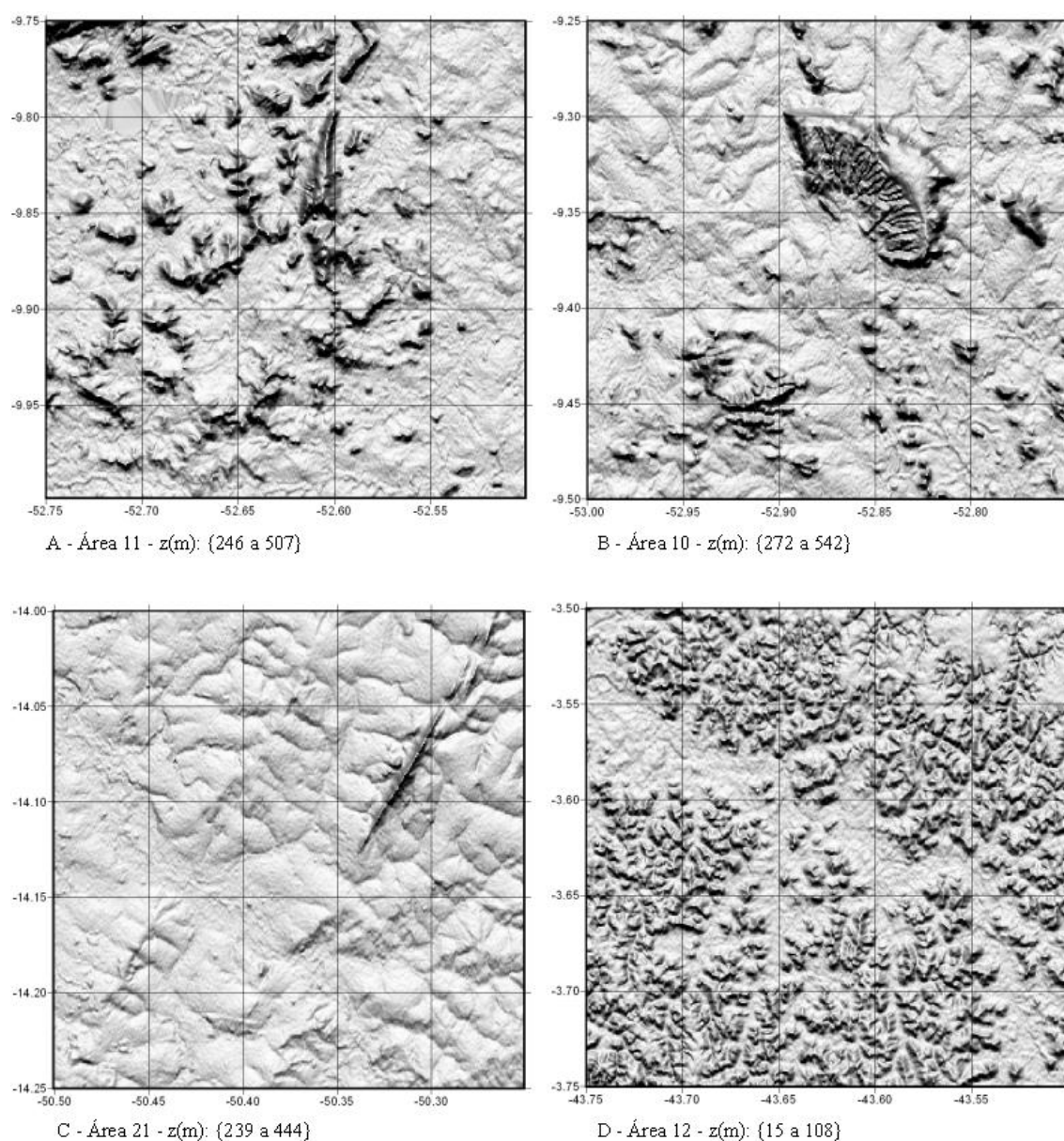


Figura 3.16 – Relevo das áreas de estudo 11 (A), 10 (B), 21 (C) e 12 (D).

A Figura 3.17 A-D reúne terrenos planos, nos quais a fonte predominante de variação dos dados é o efeito dossel. A amplitude máxima destes dados é da ordem de dezenas de metros, dos quais o efeito dossel responde por pelo menos 20m. O caso extremo é o da porção leste da Ilha de Marajó (Figura 3.17-D), cujas altitudes predominam na faixa entre 2m a 6m, enquanto o efeito dossel acrescenta até cerca de 30m ao MDE de dados SRTM.

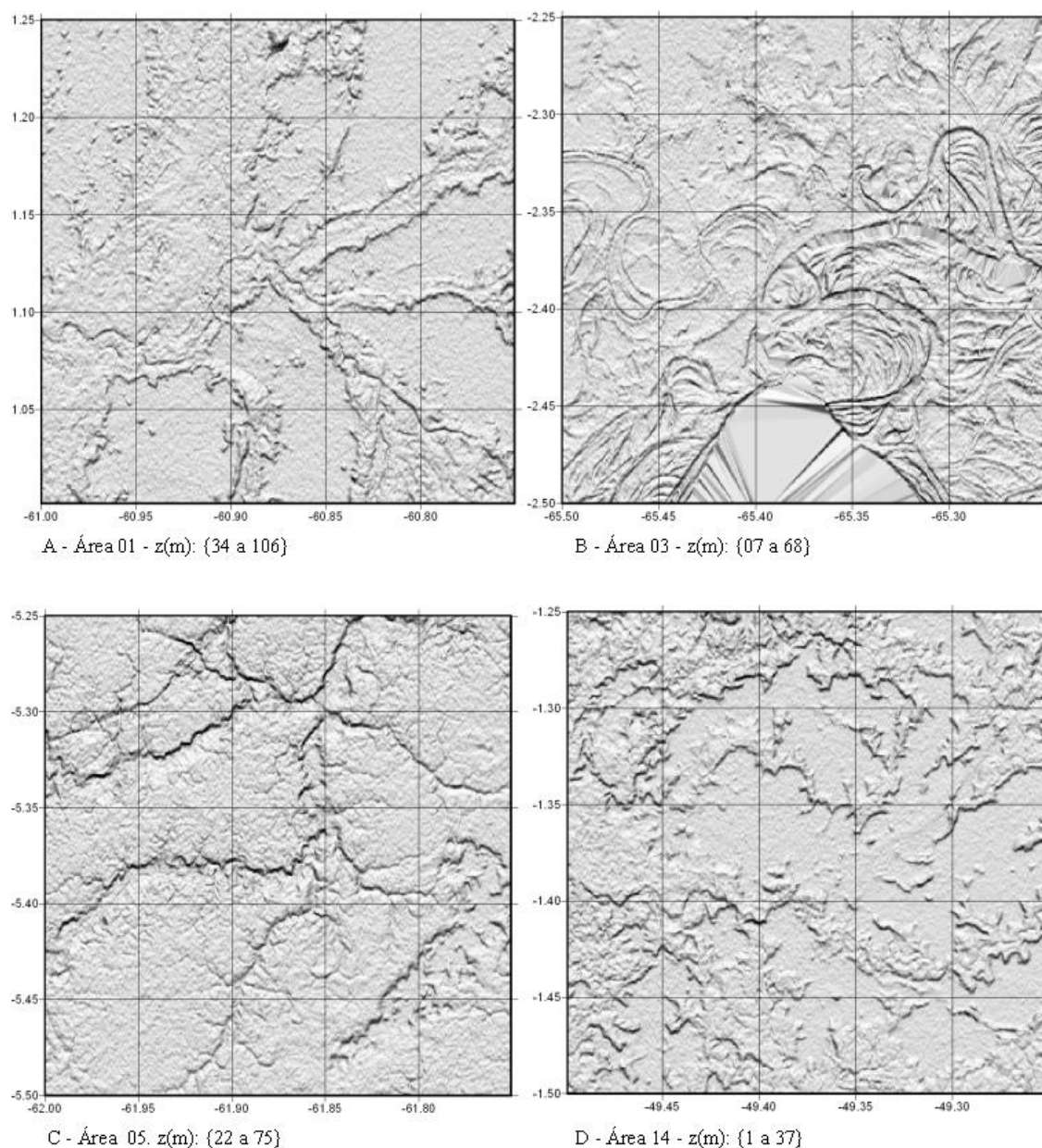


Figura 3.17 – Relevo das áreas de estudo 1 (A), 3 (B), 5 (C) e 14 (D).

A preservação das características exibidas pela superfície do dossel, assim como sua distribuição, pode ser importante para a identificação de características geológicas, dada a possibilidade de a vegetação expressar nos dados SRTM efeitos pedológicos que condicionam seu desenvolvimento. No caso específico do sudeste da Ilha do Marajó, a distribuição do dossel florestal em meio a áreas de vegetação rasteira tem correspondência direta com a formação de pequenas bacias sedimentares quaternárias geradas por falhas tectônicas (Figura 3.18).

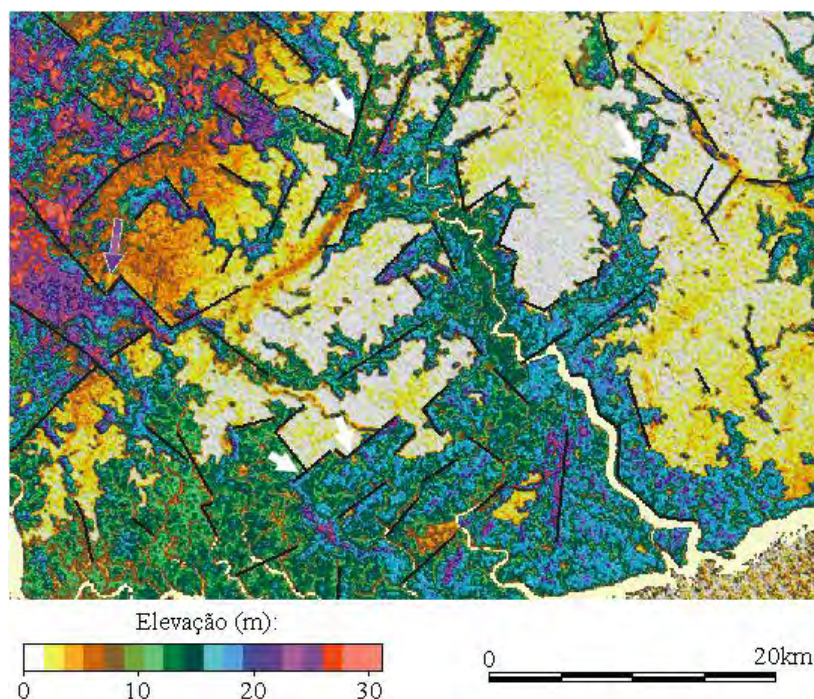


Figura 3.18 – Distribuição do efeito dossel relacionada à formação de bacias sedimentares geradas por falhas, no sudeste da Ilha do Marajó. Fonte: adaptado de Rossetti et al. (2008).

4 RESULTADOS

As áreas de teste foram escolhidas em função dos critérios definidos *a priori*, sem que pudesse haver uma antecipação do possível desempenho dos testes nas diferentes situações. Os cuidados para garantir o máximo de diversidade de formas de relevo dentro do conjunto analisado, entretanto, mostraram-se superestimados diante a observação dos modelos da Figura 3.10 à Figura 3.17. Em analogia ao que já se havia observado sobre a variabilidade espacial de amostras entre compartimentos geomorfológicos distintos (item 3.1; Figura 3.1), os testes mostraram-se (*a posteriori*) resolvidos mais adequadamente entre configurações tridimensionais de um pequeno número de detalhes geométricos do que considerando a representatividade entre biomas, domínios geomorfológicos e outros aspectos pertinentes a escalas generalizadas. De qualquer modo, considerou-se remota a possibilidade de haver condições de relevo que não tenham sido representadas no conjunto e todas as 40 áreas foram exaustivamente avaliadas sob exame visual de ampliações detalhadas de relevo sombreado.

Essencialmente, o processamento aplicado aos testes consiste no refinamento dos dados das áreas selecionadas de 3” para 1” de resolução. Estes segmentos do MDE de dados SRTM foram refinados de 300x300 *pixels* para 900x900 *pixels* com krigagem pelos modelos X2, S4 e G3. Nas Figuras 4.1 a 4.7, os testes estão apresentados em relevo sombreado na escala absoluta aproximada de 1:70.000. O relevo sombreado apresentado seguiu a configuração de iluminação de Norte com 60° de elevação, além do exagero vertical de 12x.

O poder descritivo do MDE de terrenos montanhosos (Figura 4.1) mostrou-se relativamente invariável com as diferentes preparações, com exceção de uma sinuosidade ligeiramente maior das curvaturas no modelo G3. Uma maior estabilidade das características do MDE em tais condições havia sido sugerida desde estudos da preparação de dados de isolinhas (VALERIANO, 2002). A maior variação altimétrica desta situação mostra-se predominante sobre todos os possíveis problemas dos dados topográficos. Em cartas topográficas, tem-se um grande número de isolinhas nas vertentes, à maneira que ocorre com cartas de escalas detalhadas, em que as equidistâncias verticais são pequenas em relação à amplitude. Sobre dados SRTM,

amplitudes maiores tendem a fornecer maiores desvios entre os dados vizinhos do MDE original, o que faz as estimativas interpoladas relativamente menos suscetíveis às variações da distribuição de peso (v. Figuras 2.3 e 3.7) do que em relação às variações altimétricas de entrada. Pode-se esperar que este mesmo mecanismo atue de modo a encobrir ou a atenuar possíveis ocorrências de efeito dossel.

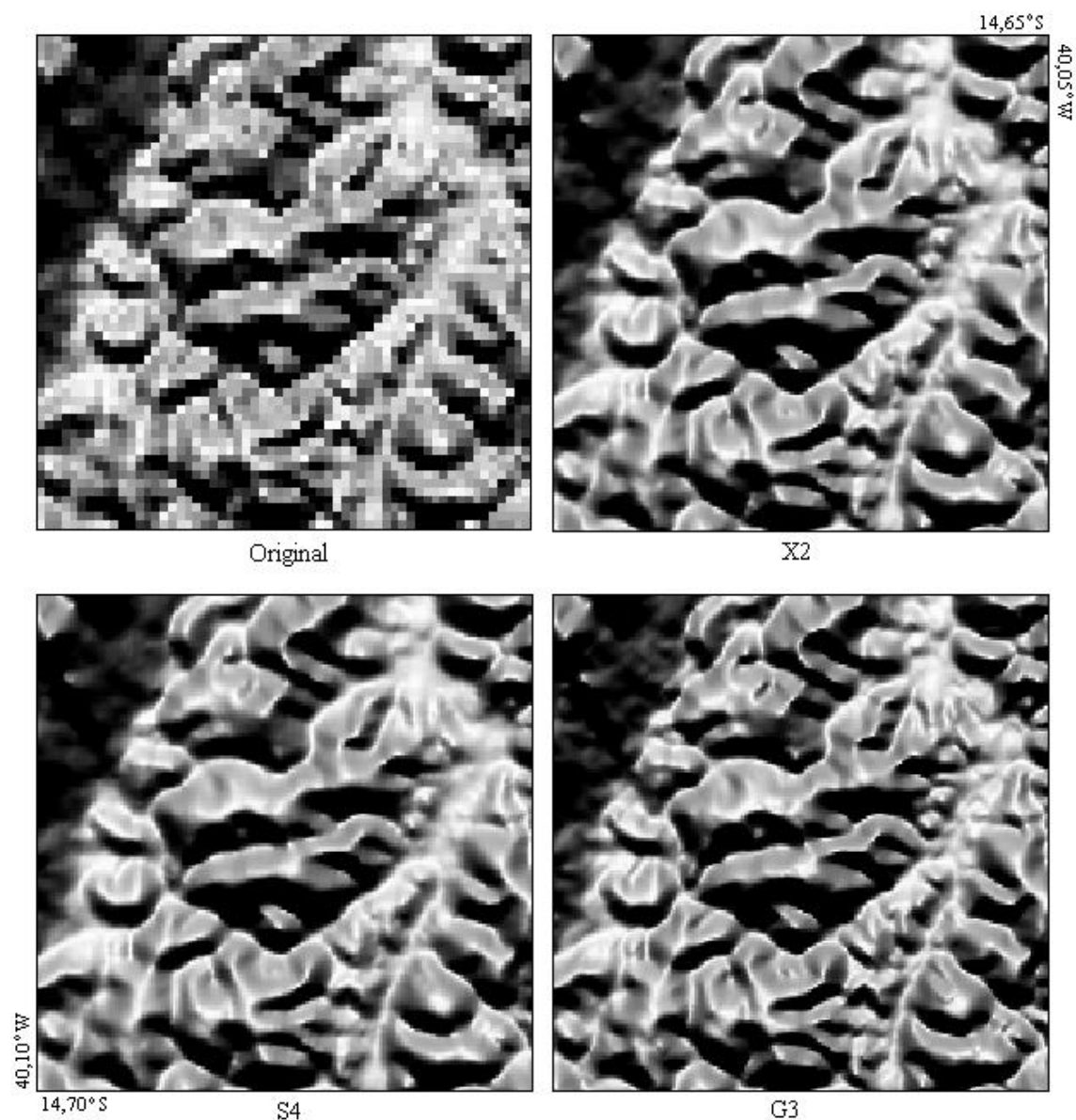


Figura 4.1 – Teste de interpoladores sobre área montanhosa (I): morros de topo arredondado. Além da dimensão vertical, as feições que caracterizam terrenos montanhosos são de dimensões horizontais relativamente grandes, o que permite sua observação em escala

generalizada, assim como diretamente sobre os dados originais. Restritas aos detalhes, as diferenças dadas pela forma de preparação mostram-se inócuas na interpretação e análise nestas condições. Contudo, terrenos de grande amplitude altimétrica podem merecer cuidados detalhados à medida que apresentam singularidades como escarpas e arestas, situação comum, porém não exclusiva, da borda de chapadas (Figura 4.2).

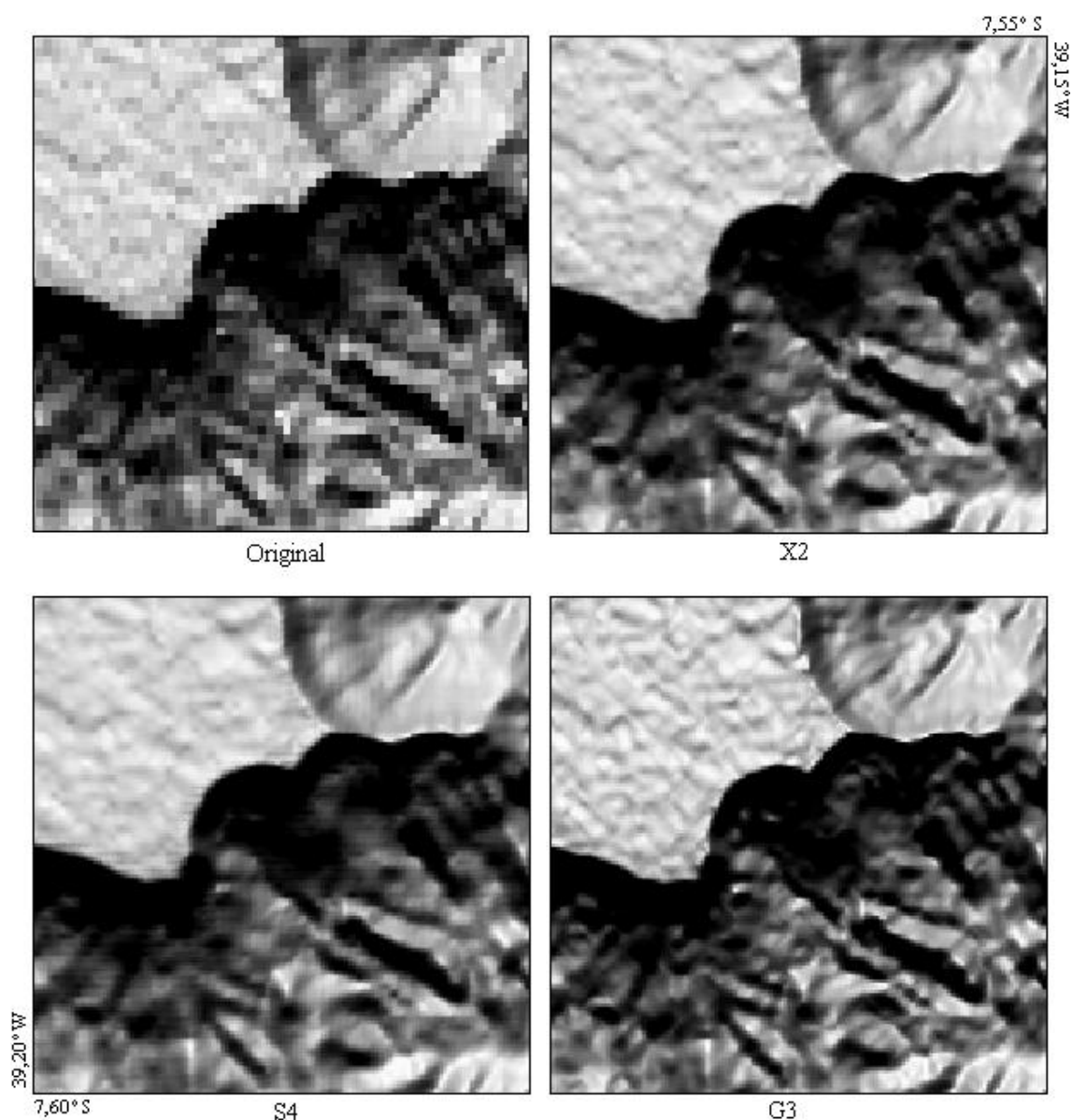


Figura 4.2 – Teste de interpoladores sobre área montanhosa (II): chapada, escarpa e arestas. Tais singularidades expressam em seu formato áreas com erosão ativa e inativa, conforme o modo como se apresentam as transições, abruptas/angulares ou

graduais/arredondadas, respectivamente. Para este caso, a angularidade das arestas torna-se um aspecto interessante de se preservar, além de ser intrinsecamente uma característica sensível aos métodos de interpolação. Os exames mostraram que a linha de cumeada orientada E-W ao nordeste da área ilustrada na Figura 4.2 mostrou-se sutilmente mais delgada no modelo G3. De modo menos sutil, percebe-se que este modelo também resultou na maior definição da borda da chapada, enquanto os modelos X2 e S4 resultaram em ligeiro arredondamento da mesma.

Tais observações não se puderam confirmar sobre a feição principal da Figura 4.3, uma linha de cumeada (SW-NE) extremamente aguda, simétrica transversalmente e reta longitudinalmente. Porém, quando os modelos são olhados conjuntamente, pode-se perceber nos modelos uma sutil sinuosidade desta feição, que apresenta mais inflexões no modelo G3. A maior diferença entre os modelos ocorre na rugosidade do terreno mais baixo, mais detalhadamente caracterizado pelo modelo G3, seguido pelo X2. O modelo S2 foi o que mostrou maior suavização da rugosidade entre os três. Esta mesma observação pode ser feita sobre o topo plano da chapada apresentada na Figura 4.2.

A observação do efeito da preparação do MDE sobre a textura topográfica de terrenos com alta densidade de feições (Figura 4.4) mostrou uma relativa estabilidade do poder descritivo dos MDE interpolados. O teste dos interpoladores mostrou-se semelhante àquele observado para terrenos montanhosos (Figura 4.1), exceto que neste caso o MDE original se apresenta confuso para a interpretação, devido à densidade e ao tamanho das feições, muito próximos das resolução. É razoável supor que a declividade seja o fator diretamente responsável pela estabilidade dos MDE refinados observada aqui e na Figura 4.1, e que a amplitude altimétrica, portanto, atue indiretamente, devido à sua correlação espacial com áreas íngremes. Assim, as áreas representadas nas Figuras 4.1 e 4.4 são relativamente íngremes, o que permite haver uma grande variação altimétrica dos dados de entrada dentro da área de busca de cada ponto estimado. Porém, devido ao pequeno comprimento de rampa (bem como às pequenas dimensões dos elementos de textura), ao contrário das feições amplas das regiões montanhosas, o processo de refinamento permite notável melhoria do poder descritivo do MDE.

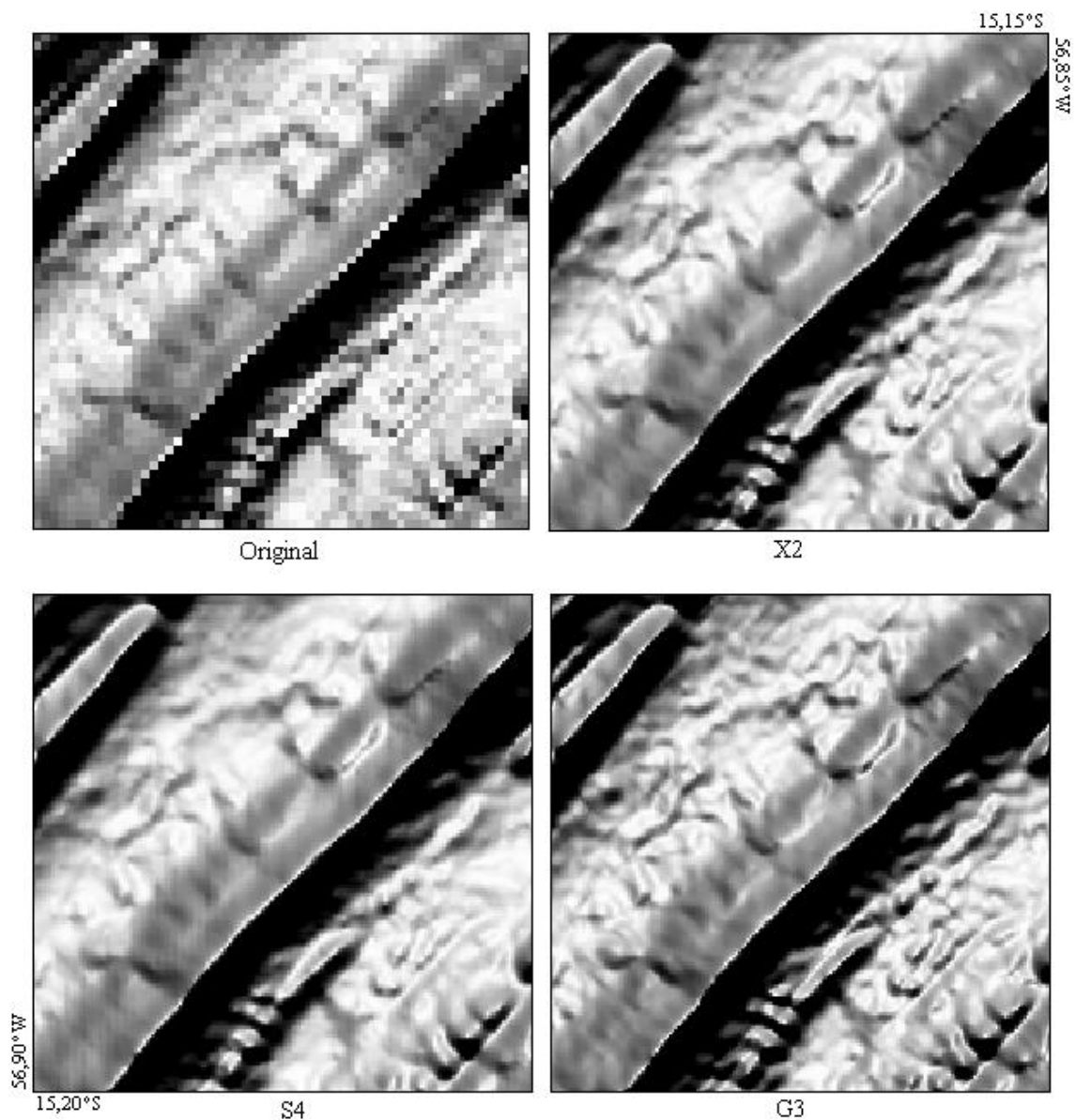


Figura 4.3 – Teste de interpoladores sobre linha de cumeada em arestas agudas.

Os testes com terrenos baixo-predominantes (Figura 4.5) e alto-predominantes (Figura 4.6) mostraram pequenas modificações na caracterização das principais (maiores) singularidades em função dos diferentes modelos. As elevações esparsas do relevo baixo-predominante (Figura 4.5) mantiveram seus perfís (seção transversal) praticamente inalterados, enquanto se pode observar um ligeiro detalhamento das curvaturas horizontais dado pelo modelo G3: as reentrâncias (áreas com dissecação) das vertentes apresentam-se mais definidas.

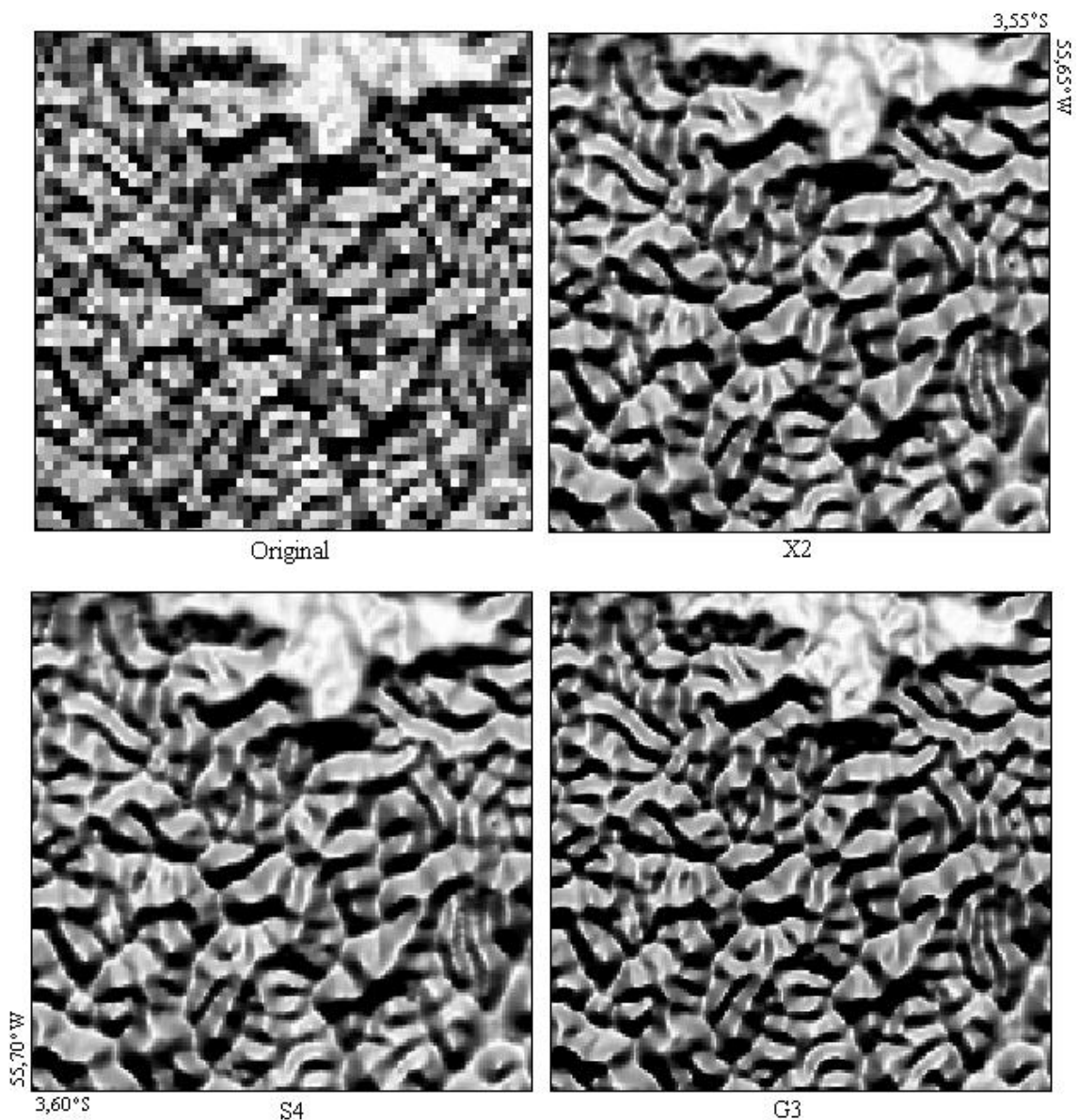


Figura 4.4 – Teste de interpoladores sobre textura de alta densidade de drenagem.

No terreno alto-predominante, a drenagem oferece condições mais variadas para avaliar os efeitos sobre as singularidades, à medida que há uma diminuição nas dimensões dos canais em direção das nascentes (Figura 4.6). Pode-se perceber que a expressão das pequenas nascentes se confunde com os elementos côncavos da textura do padrão predominante, numa indicação da origem das captações de primeira ordem. A observação de tal aspecto permite listar os modelos S4, X2 e G3, respectivamente, numa ordem crescente do poder de detalhamento.

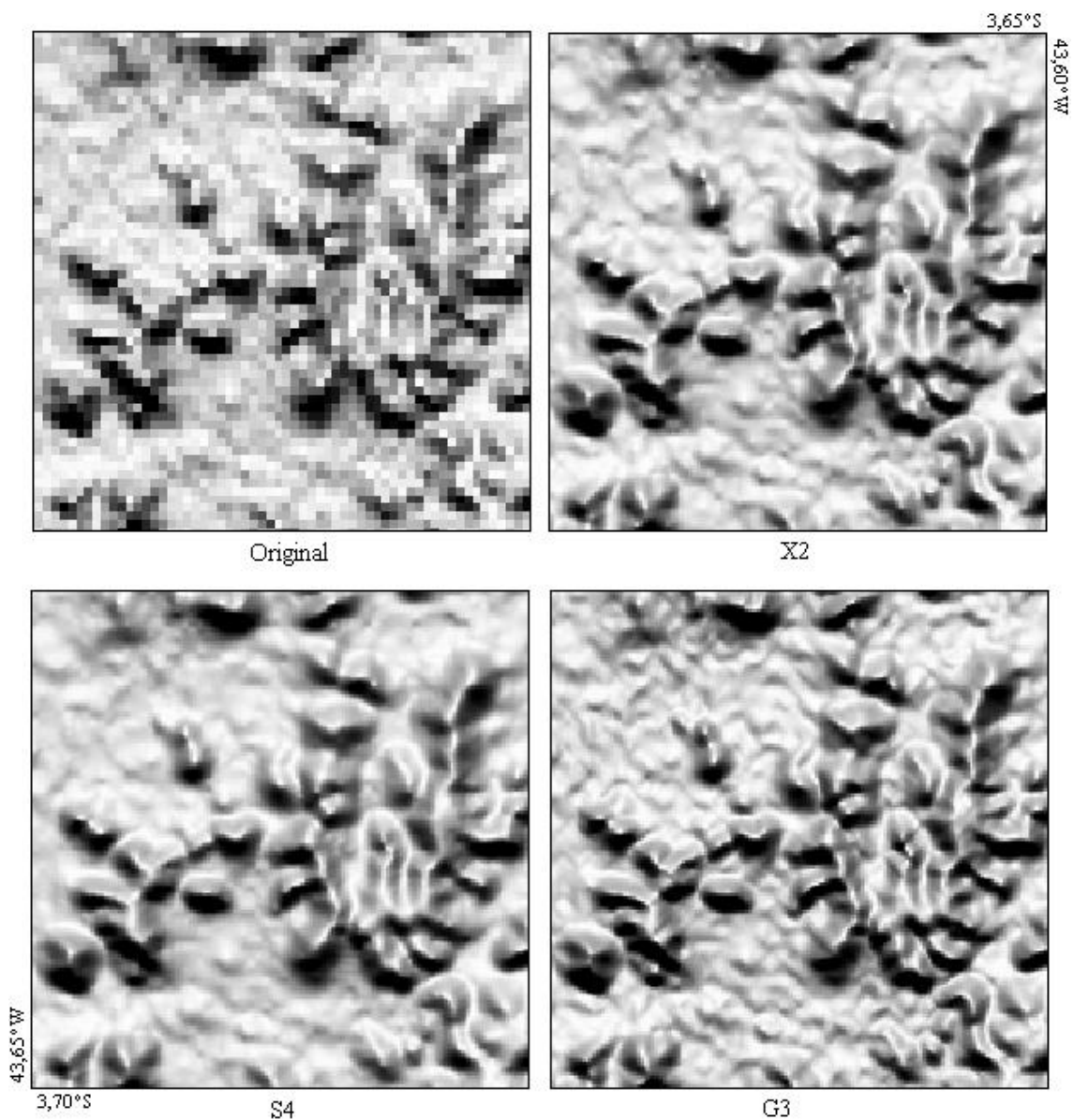


Figura 4.5 – Teste de interpoladores sobre terreno baixo-predominante.

Em todos os testes descritos até aqui, é interessante observar que as áreas planas, mesmo quando incluídas marginalmente em segmentos selecionados por outras características, mostraram-se mais indicativas do desempenho das interpolações. Tal fato sugere que as feições delicadas do terreno são mais sensíveis aos processos de preparação ou, reciprocamente, que a percepção de feições verticalmente amplas pode prescindir de cuidados no pré-processamento. Por outro lado, a ausência destes mesmos cuidados pode limitar o potencial de informação dos dados SRTM nesse nível, com

possível perda de detalhes observados em grande escala, geralmente associados à caracterização do relevo em níveis mais avançados de descrição. Entre estes detalhes pode-se listar: textura, rugosidade e padrão. Assim, pode-se dizer que o modelo G3 apresentou maior potencial para a manutenção de informações mais refinadas tanto do ponto de vista geométrico como temático.

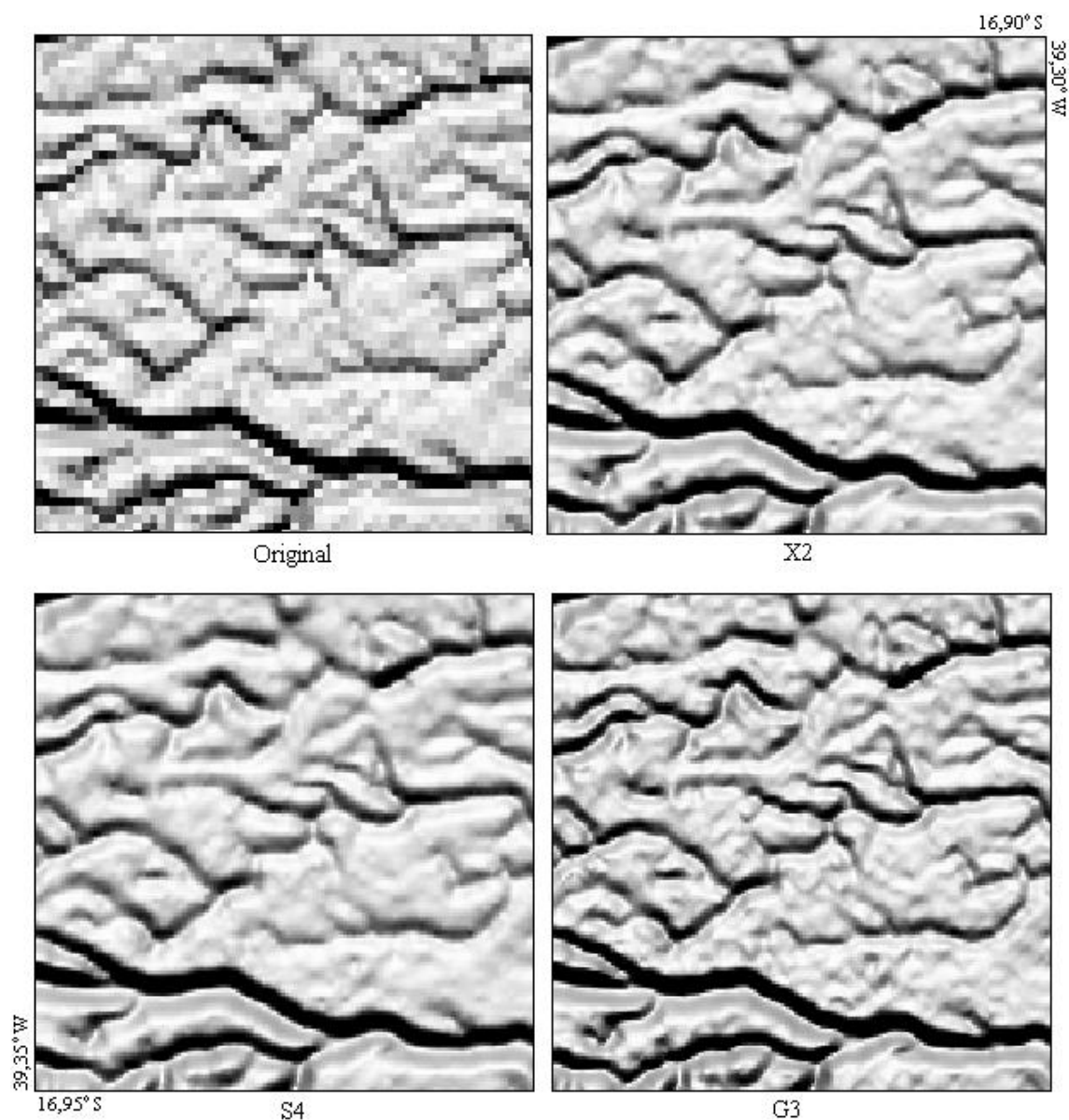


Figura 4.6 – Teste de interpoladores sobre terreno alto-predominante.

Interessante observar que este modelo é gaussiano e tem alcance relativamente longo, o que, de acordo com observações gerais deste e de outros estudos (VALERIANO, 2002 e

GROHMANN e STEINER, 2008), pode ser relacionado a um efeito de suavização. Tal observação pode parecer contraditória quando se lembra que o modelo de semivariância foi selecionado com base na sua capacidade de preservar detalhes e não de suavizá-los. No entanto, o detalhamento obtido está de acordo com o efeito esperado pela ausência de efeito pepita que, na interação entre os coeficientes geoestatísticos, mostrou-se preponderante em relação aos dois primeiros, ainda que antagonísticos.

Dentre os testes dirigidos a terrenos de relevo delicado, o teste da área 13 acrescentou um elemento inesperado à avaliação dos modelos, relacionado à amostragem de feições de distribuição regular e grande frequência espacial, o *efeito Moiré* (Figura 4.7). Ao nordeste da área representada, observam-se feições paralelas orientadas NW-SE, relacionadas a morfologias de paleodunas, conforme se pode ver no modelo G3 (confirmado em imagens óticas - *Google Earth*, Figura 4.8). Nos demais modelos, percebe-se um padrão de feições ortogonais a esta orientação, enquanto que, nos dados originais, sua percepção mostra-se ainda mais comprometida, devido ao efeito Moiré. Este efeito é um padrão de interferência advindo da sobreposição de duas grades com espaçamentos aproximados ou com deslocamento angular (TAKASAKI, 1970). Como regra, diz-se que as condições ideais para sua ocorrência é uma proporção de 1,0 a 2,0 entre os espaçamentos, de modo a se criar uma alternância cíclica entre períodos de interferências positivas (construtivas) e negativas (destrutivas).

Numa medição gráfica sobre o modelo G3 (*Global Mapper*), estimou-se que estas feições se distanciam cerca de 195m, num padrão cíclico regular. Projetando esta configuração nos eixos x e y , obtém-se aproximadamente 138m, o que corresponde a 1,5 vezes o espaçamento dos dados SRTM originais, condições para o efeito Moiré. Apenas o refinamento dos dados SRTM não se mostrou suficiente para superar este problema, como atestam os testes S4 e X2. Verifica-se, por outro lado, que houve uma feliz combinação da distribuição de pesos pelo modelo G3 com a configuração altimétrica dos dados de entrada, de tal modo que o efeito Moiré foi minimizado. Não se garante que este modelo supere sempre este efeito, pois outros padrões cíclicos podem oferecer outra situação de frequências e amplitudes, em arranjos diferentes, de modo a produzirem combinações espúrias com a distribuição dos pesos no raio de busca aplicado.

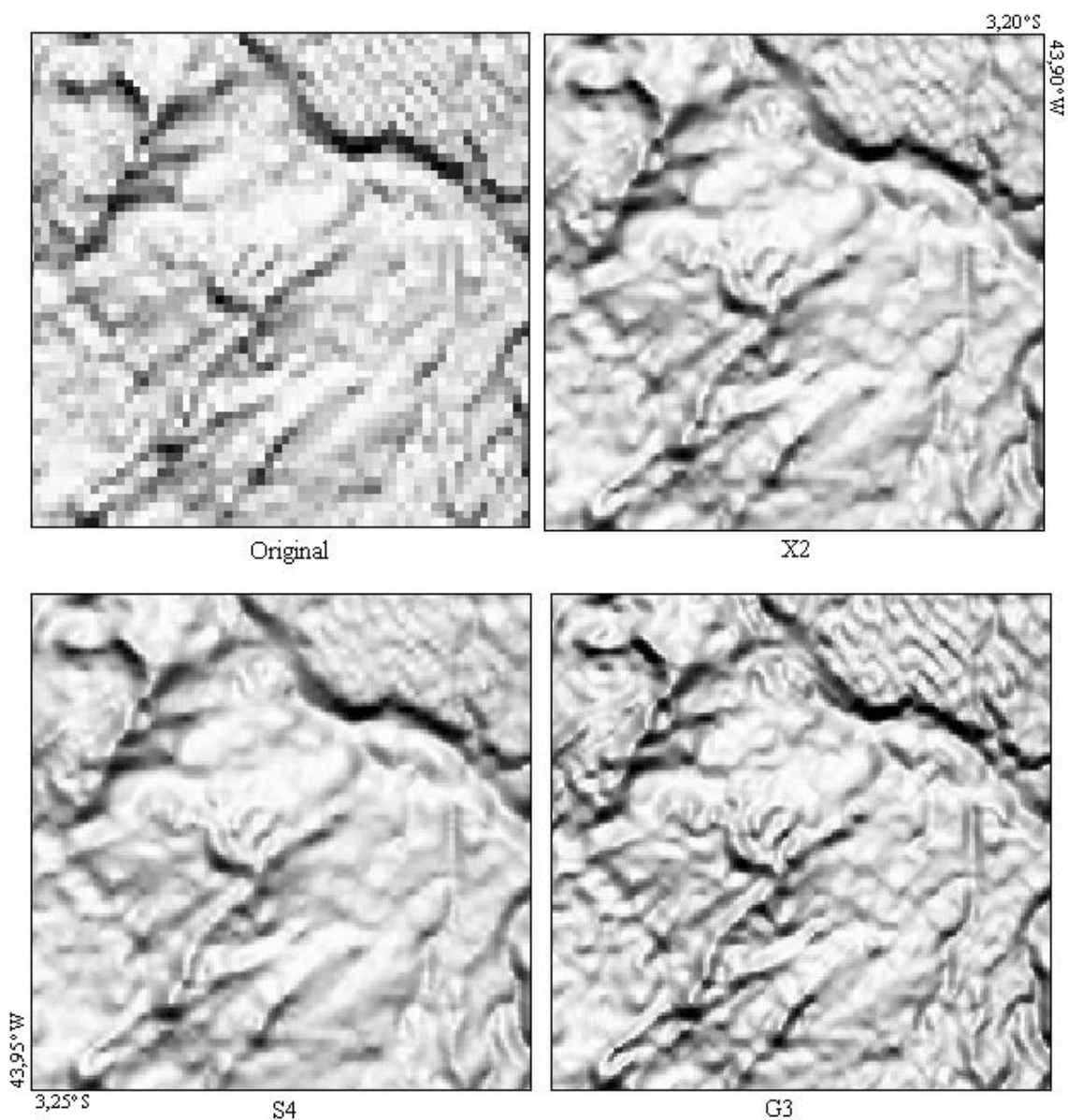


Figura 4.7 – Teste de interpoladores sobre feições de alta frequência espacial.

A possibilidade de superar o efeito Moiré sobre feições de dimensões entre 1,0 e 2,0 vezes o espaçamento SRTM permite que sejam caracterizadas estruturas com elementos desse tamanho, como pequenos interflúvios, de pouco mais de 100m, em áreas de alta densidade de drenagem. Esse mecanismo parece estar por trás da sensível melhora do MDE refinado no Estado do Acre, cujo relevo apresenta uma notável densidade de drenagem, como verificado logo aos primeiros testes de krigagem de dados SRTM (VALERIANO, 2004, Figura 4.15). Deve-se ressaltar que, embora se consiga avançar a percepção até feições dessa magnitude, não se garante sua qualidade posicional nas

escalas em que estas são observadas, lembrando que há pelo menos 3 arco-segundos, pela resolução original, de flutuação posicional.



Figura 4.8 – Imagem ótica (*Google Earth*) das Paleodunas mostradas na Figura 4.7.

A questão posicional como limitação ao detalhamento da escala pode ser oportunamente esclarecida neste ponto. É importante lembrar que o refinamento dos dados para 1 arco-segundo visa principalmente à ampliação da possibilidade de se extraírem informações dos dados SRTM, por um mecanismo de redistribuição da variabilidade espacial, para que as derivações possam ser feitas sob intervalos menores. Em termos do conteúdo de informação, não há ganhos, apenas uma reorganização das cotas altimétricas para preservar e viabilizar análises daquilo que o sistema sensor pôde captar no processo de aquisição. Há que se diferenciar o conceito de resolução de aquisição (inalterável) da resolução de armazenamento, esta sim, refinada: o MDE refinado para aproximadamente 30m não será capaz de registrar feições com este tamanho. Sobre a krigagem dos dados SRTM, Miliaresis (2007, c.p.) ressalta que, mesmo que o refinamento nos permita a análise de feições cuja observação requeira tipicamente escalas mais detalhadas, a missão SRTM foi projetada para suprir informações que atendam a especificações posicionais de escalas entre 1:250.000 e 1:100.000. Em outras palavras, o refinamento pode favorecer análises mais detalhadas do relevo, mas não aumentar o conteúdo de informação nem sua qualidade posicional.

Para o caso em que se queiram estudos detalhados em escalas mais detalhadas do que 1:100.000, pode-se aventar uma série de alternativas, cujo sucesso dependerá das condições vigentes, dos objetivos, dos recursos disponíveis e de alguma criatividade do usuário. Os testes mostraram que as flutuações posicionais são tais que não se consegue um registro aceitável em relação ao registro de feições de mapas na escala de 1:50.000 com uma única função de mapeamento. Assim, como último recurso, sugere-se que as informações possam ser ajustadas localmente, sob esquema de registro conhecido como *rubbersheet*, mediante o posicionamento dos extremos de cada interflúvio (entre talvegues) ou de cada vertente (da linha de cumeada ao talvegue), ou de outras feições notáveis distribuídas na área de interesse, desde que se tenham pontos de controle nas especificações adequadas. Caso se atenda aos quesitos posicionais nestas escalas, permanecerá a limitação do conteúdo informativo dada pelo espaçamento de aquisição dos dados de 90m.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo buscou a seleção de coeficientes geoestatísticos para a interpolação de dados SRTM por todo o território nacional, como objetivo central. Embora se possam apresentar numerosas ressalvas a respeito de critérios baseados em interpretação visual, os resultados mostraram-se consistentemente inequívocos: o modelo selecionado foi avaliado como superior pela totalidade dos intérpretes consultados, e em todas as situações testadas.

Ao lado da importância estratégica deste resultado por si, a condução dos experimentos trouxe informações que, ora adjacentes, devem contribuir para a compreensão do refinamento aplicado aos dados SRTM, bem como para a condução de iniciativas correlatas. Assim, algumas considerações teóricas e experimentais decorrentes desta pesquisa merecem ser assinaladas:

- A krigagem pode apresentar resultados muito distintos, de acordo com os coeficientes geoestatísticos aplicados.
- As características de desempenho da krigagem decorrem de uma interação complexa entre dados geoestatísticos – tipo, alcance, sela e pepita – que dificulta a previsão dos seus efeitos.
- Reciprocamente, não se pode prever uma relação consistente e unívoca entre o tipo de relevo analisado e os resultados geoestatísticos de seus conjuntos amostrais retirados de dados SRTM.
- Os terrenos com relevo de feições mais delicadas mostraram-se mais sensíveis aos efeitos, favoráveis ou desfavoráveis, causados por diferentes processos de refinamento.
- Foi possível encontrar um conjunto de coeficientes cuja aplicação atendessem aos critérios desejados nas diversas situações de relevo estudadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ATKINSON, P. M. Optimal sampling strategies for raster-based geographical information systems. **Global Ecology and Biogeography Letters**, v.5, p.271-80, 1996.
- CRESSIE, N. A. C. **Statistics for spatial data**. New York: John Wiley e Sons, 900p. 1993.
- ENGLUND, E., SPARKS, A. **GEO-EAS (Geostatistical Environmental Assesment Software): user's guide**. Las Vegas: Environment Monitoring Systems Laboratory/Office of Research and Development. U.S. Env. Protection Agency, 1988. (EPA 600/4-88/033)
- ISAAKS, E. H., SRIVASTAVA, R. M. **An Introduction to Applied Geostatistics**. Oxford University Press, New York, 561 pp. 1989.
- LANDIM, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos**. 2a. edição revista e ampliada. São Paulo/SP: Fundação Editora da UNESP/FEU, 253 p. 2003.
- LEGENDRE, P. Spatial autocorrelation: trouble or new paradigm? **Ecology**, v.74, n.6, p.1659-73, 1993.
- MILIAREISIS, G. **Comentários sobre o refinamento**. Comunicação pessoal (carta). Janeiro de 2007.
- MIRANDA, E. E. (Coord.) **Brasil em Relevô**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 20 jan. 2007.
- OLIVER, M. A., WEBSTER, R. Kriging: a method of interpolation for geographical information systems. **International Journal of Geographical Information Systems**, n.4, p.313-32, 1990.
- 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.
- ROSSETTI, D. F.; GÓES, A. M.; VALERIANO, M. M. ; MIRANDA, M. C. C. Quaternary tectonics in a passive margin: Marajó Island, northern Brazil. **Journal of Quaternary Science**, v.23, p.121-135, 2008.
- SALVIANO, A. A. C.; VIEIRA, S. R.; SPAROVEK, G. Variabilidade espacial de atributos de solo e de *Crotalaria juncea* L. em área severamente erodida. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, n.1, p.115-122, 1998.
- TAKASAKI, H. Moiré topography. **Applied Optics**, Washington, v.9, n.6, p.1467-1472, 1970.
- VALERIANO, M. M.; ABDON, M. M. Aplicação de dados SRTM a estudos do Pantanal. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 59, p. 63-71, 2007.

VALERIANO, M. M. **Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul**. São José dos Campos, SP: INPE: Coordenação de Ensino, Documentação e Programas Especiais (INPE-10550-RPQ/756). 72p. 2004.

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

VALERIANO, M. M.; PICINI, A. G.; MELLO, M. H. A. Estratificação de efeitos anisotrópicos do relevo na geração de mapas pluviométricos por geoprocessamento. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, RS, v. 10, n. 1, p. 167-177, 2002.

VALERIANO, M. M.; SANTOS, A. O. Mapping of plant-soil data with high random variability. **Acta Scientiarum** (UEM), Maringá, PR, v. 24, n. 5, p. 921-928, 2002.

VALERIANO, M. M.; PRADO, H. Técnicas de geoprocessamento e de amostragem para o mapeamento de atributos anisotrópicos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 25, n. 3, p. 997-1005, 2001.

WATSON, D. F. Contouring: A Guide to The Analysis and Display of Spatial Data. **Computer methods in The Geosciences**, s.l: Elsevier Science v.10, 1994.