

GUILHERME DE CASTRO OLIVEIRA

**PRECISÃO DE MODELOS DIGITAIS DE TERRENO,
MAPEAMENTO AUTOMÁTICO DE APPS EM TOPOS
DE MORROS E A EFICÁCIA DO NOVO CÓDIGO
FLORESTAL**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de
Viçosa, como parte das
exigências do Programa de Pós-
Graduação em Solos e Nutrição
de Plantas, para obtenção do
título de Magister Scientiae.

**VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2015**

T

O48p
2015

Oliveira, Guilherme de Castro, 1986-
Precisão de modelos digitais de terreno, mapeamento automático
de APPs em topos de morros e a eficácia do novo Código Florestal /
Guilherme de Castro Oliveira. - Viçosa, MG, 2015.
x, 139f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Elpidio Inácio Fernandes Filho.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: 130-139.

1. Geoprocessamento. 2. Áreas de preservação permanente. 3.
Topo de morro. 4. Brasil. [Código Florestal (2012)]. 5. Direito
ambiental. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Solos.
Programa de Pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas. II. Título.

CDD 22. ed. 550

GUILHERME DE CASTRO OLIVEIRA

**PRECISÃO DE MODELOS DIGITAIS DE TERRENO,
MAPEAMENTO AUTOMÁTICO DE APPS EM TOPOS
DE MORROS E A EFICÁCIA DO NOVO CÓDIGO
FLORESTAL**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de
Viçosa, como parte das
exigências do Programa de Pós-
Graduação em Solos e Nutrição
de Plantas, para obtenção do
título de Magister Scientiae.

APROVADA: 13 de março de 2015.

Luis Marcelo Tavares de Carvalho

Sebastião Renato Valverde

Marcio Rocha Francelino
(Coorientador)

Elpidio Inacio Fernandes Filho
(Orientador)

À minha avó Efigênia (in memoriam),
aquela que deixou tanto amor pelo caminho.

AGRADECIMENTOS

À **Universidade Federal de Viçosa (UFV)** e ao **Departamento de Solos (DPS)** pela oportunidade de realização deste curso.

À **Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES)**, pela concessão da bolsa.

Ao meu orientador, **Prof. Dr. Elpídio Inácio Fernandes Filho**, pela confiança em meu trabalho em todos esses anos. Por ter acreditado no meu potencial e pela amizade criada. Pelas inúmeras conversas de onde germinaram tantas idéias proveitosas.

A todos os professores do Programa de Pós-graduação em Solos e Nutrição de plantas.

A companhia VALE S/A pelo fornecimento dos dados do levantamento a laser.

Aos colegas do LABGEO, que muito contribuíram para minha formação desde a graduação: **Raquel Portes, Mateus Henrique, Fernanda Matuk, Bruno Mendonça, Pedro Christo, Bruno Nery, Maola Faria, Giovanni Giacomini, Victor Hugo, Adriano e Renato.**

Aos meus pais **Adriel Rodrigues de Oliveira** e **Maria Cristina Castro**, por terem me criado no caminho da honestidade e do bem, por me ensinarem que o sucesso só pode ser alcançado pelo trabalho. À minha irmã **Adna Cecília**, pelo amor e carinho. Aos meus avós, tios e tias que sempre me apoiaram.

À minha querida **Laura**, pelo amor, companheirismo e zelo. Pelo grande apoio na última etapa do trabalho, sou eternamente grato.

À música, fiel companheira em todos os momentos da vida e aos compartes do **Quinto: Renan, Diogo, Vinícius, e Fernando**, pelos tantos momentos compartilhados na estrada e no palco e pelas boas lembranças que ficarão para sempre.

Ao meu amigo **Lucas Azevedo de Carvalho**, advogado, pela atenção e solicitude para discutir os aspectos jurídicos do trabalho.

Aos amigos do “**Paradise**”, especialmente o **Leonzinho!**

A Deus.

BIOGRAFIA

GUILHERME DE CASTRO OLIVEIRA nasceu em 2 de agosto de 1986 em Viçosa - MG, Brasil. Filho de Maria Cristina Castro e Adriel Rodrigues de Oliveira.

Cursou o ensino médio no Colégio de Aplicação – COLUNI/UFV entre os anos de 2001 e 2003.

Em 2005 iniciou o curso de Engenharia Florestal na Universidade Federal de Viçosa, onde se graduou em julho de 2010.

Foi bolsista de pesquisa nos anos de 2011 e 2012 pelo projeto Mudar Gerais, coordenado pelo Prof. Sebastião Renato Valverde (DEF-UFV).

Em março de 2013 iniciou o mestrado no Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, nível mestrado, da Universidade Federal de Viçosa, com ênfase em geoprocessamento.

ÍNDICE

RESUMO	vii
ABSTRACT	ix
INTRODUÇÃO GERAL	1
ÁREAS DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE EM TOPOS DE MORRO NO NOVO CÓDIGO FLORESTAL.	3
1. Introdução	4
2. Materiais e métodos	5
3. Discussão	5
3.1 Áreas de Preservação Permanente	5
3.2 Áreas de Preservação Permanente em topos de morros	8
3.3 Mapeamento das APPs em topos de morros	10
3.4 Regulamentação do inciso IX, artigo 4º da Lei 12.651/2012	14
4. Conclusões	16
AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO GRATUITOS NO BRASIL, USANDO DADOS LIDAR COMO REFERÊNCIA.	17
1. Introdução	18
2. Materiais e métodos	26
2.1 Área de estudo	26
2.2 Bases de dados e softwares utilizados	26
2.3 Validação dos MDEs.	29
2.3.1 Estatísticas descritivas	29
2.3.2 Medidas de precisão dos modelos	30
2.3.3 Padrão de Exatidão Cartográfica	31
2.3.4 Modelagem da distribuição espacial dos erros de estimativa por geoestatística	31
2.3.5. Precisão dos modelos e declividade do terreno	33
3. Resultados e discussão	35
3.1 Estatísticas descritivas	35
3.2 Determinação do tamanho amostral e validação dos MDEs	39
3.3 Padrão de exatidão cartográfica	50
3.4 Propagação da incerteza pelos derivativos da altitude	52
3.5 Precisão dos MDEs e declividade do terreno	54
3.6 Resolução espacial e precisão dos MDEs	57
3.7 Distribuição espacial dos erros de estimativa	61
4. Conclusões	65
PRECISÃO ALTIMÉTRICA DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO (MDES) PRODUZIDOS POR INTERPOLADORES	67
1. Introdução	68
2. Materiais e Métodos	72
2.1 Bases de dados	72
2.2 Interpolação e validação dos dados	74
2.3 Validação dos MDEs construídos a partir de pontos extraídos das curvas de nível do IBGE.	75
3. Resultados e discussão	76

3.1 Validação de MDEs criados por interpolação	76
3.2 Validação de MDEs construídos a partir de pontos extraídos de curvas de nível.	77
4. Conclusões	82
PROPOSTA METODOLÓGICA EM SIG PARA DELIMITAÇÃO DE ÁREAS DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE EM TOPOS DE MORRO, SEGUNDO A LEI 12.651/2012	83
1. Introdução	84
2. Materiais e métodos	85
3. Resultados e discussão	86
3.1 Delimitação da área limite de cada morro.	86
3.2 Localização dos pontos de topo das elevações	88
3.3 Identificação dos pontos de sela	90
3.4 Identificação dos pontos de sela mais próximos das elevações	92
3.5 Delimitação da base do morro pela cota ponto de sela	94
3.6 Cálculo da declividade média dos morros	95
3.7 Mensuração da altura dos morros	99
3.8 Delimitação do terço superior dos morros	100
3.9 Delimitação das Áreas de Preservação Permanente	101
3.10 Sistematização das operações	102
3.11 Mapas de Áreas de Preservação Permanente em topos de morros	102
4. Conclusões	103
ASPECTOS TÉCNICOS DA DELIMITAÇÃO DE ÁREAS DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE EM TOPOS DE MORROS: ESTUDO DE CASO E SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS.	105
1. Introdução	106
2. Materiais e métodos	107
2.1 Área de estudo	107
2.2 Bases de dados	109
2.3 Simulação de cenários	110
2.4 Mensuração de erros de estimativa da altura dos morros	110
2.5 Escala de mapeamento e pontos de sela	111
3. Resultados e discussão	112
3.1 Mapeamento e simulação de cenários	112
3.2 Erros de estimativa da altura nos morros	117
3.3 Ajustes nos modelos digitais de declividade para o mapeamento de áreas de preservação permanente.	119
3.4 Escala de mapeamento e pontos de sela	121
4. Conclusões	126
CONSIDERAÇÕES GERAIS	128
BIBLIOGRAFIA	130

RESUMO

OLIVEIRA, Guilherme de Castro, M. Sc. Universidade Federal de Viçosa, Março, 2015. **Precisão de modelos digitais de terreno, mapeamento automático de APPs em topos de morros e a eficácia do Novo Código Florestal.** Orientador: Elpidio Inácio Fernandes Filho. Coorientador: Márcio Rocha Francelino.

O presente projeto de pesquisa teve como objetivo desenvolver uma metodologia em ambiente SIG para automatizar o mapeamento de Áreas de Preservação Permanente (APPs) em topos de morros, de forma a reduzir os custos envolvidos no mapeamento convencional e tornar o processo mais célere, bem como validar as bases de dados que venham a ser utilizadas para tal. Para tal, foram utilizados Modelos Digitais de Elevação (MDEs) disponíveis gratuitamente no território brasileiro, os quais sejam: ASTER, SRTM, TOPODATA e IBGE. Estes MDEs foram avaliados quanto à sua precisão altimétrica dada pelos índices: raiz quadrática do erro médio (RMSE), erro médio (EM), Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) e correlação dos derivativos da altitude (declividade, direção da vertente e curvatura) com a verdade de campo, proveniente dos dados do levantamento a laser com o sistema LIDAR. O modelo utilizado para o mapeamento foi desenvolvido em ambiente de programação Model Builder do ArcGIS 10.1. Por fim, fez-se uma análise crítica do inciso IX, artigo 4º da Lei 12.651/2012, colocando em pauta sua viabilidade técnica, os pontos de subjetividade e a necessidade de sua regulamentação. Através da simulação de cenários buscaram-se alternativas para possíveis alterações na Lei. Entre os MDEs avaliados, o que mostrou melhor desempenho em todos os quesitos avaliados foi o proveniente da base de dados do IBGE, na forma de curvas de nível na escala 1:50.000 e equidistância vertical de 20 metros. O RMSE obtido com 500 pontos de checagem foi de 11,1; 13,9; 14,6 e 21,1 para IBGE, SRTM, ASTER e TOPODATA, respectivamente. Na mesma ordem, o EM foi de -1,3; 5,0; 10,5 e 4,7. O uso de interpoladores (Krigagem, IDW, Spline e Topo To Raster) não proporcionou melhoras significativas na precisão dos MDEs, portanto não se justifica sua utilização com a finalidade de aumentar a resolução dos mesmos. O índice local de Moran (I), utilizado para análise geostatística da distribuição dos erros de estimativa dos MDEs, indicou o forte agrupamento de grandes desvios de estimativa em todas as bases de dados utilizadas, sugerindo sua correlação com feições geomorfológicas ou a cobertura do solo. Quanto aos derivativos da altitude, há baixa correlação com a base de referência, sobretudo nos MDEs de resolução inferior, reforçando a necessidade de cautela na aplicação dos MDEs e seus

derivativos nas mais diversas finalidades. Há expressiva perda de informações nos modelos digitais de declividade, gerados a partir de MDEs com baixa resolução, o que indica que, em relevos montanhosos, modelos de alta resolução necessariamente devem ser utilizados. Em função dessa perda de informações, o valor do critério de declividade média, considerados para classificar as APPs em topos de morros, deve ser dado em função da resolução do MDE utilizado. O modelo de mapeamento foi desenvolvido com sucesso no formato de uma ferramenta do ArcToolbox, sendo capaz de processar qualquer MDE em nove etapas de processamento, onde caberá ao analista somente alimentar o modelo com os dados de entrada. O produto final do geoprocessamento consiste num arquivo vetorial contendo as APPs mapeadas na forma de polígonos. Os resultados mostram que as alterações trazidas pelo NCF praticamente extinguiram as APPs em topos de morros, ao definir a base dos mesmos pela cota do ponto de sela mais próximo da elevação e simultaneamente exigir a declividade média de 25 graus e altura maior ou igual a 100 metros. Além disso, considerar o ponto de sela como divisor levou a um forte isolamento geográfico dessas áreas, bem como sua redução. A simulação de cenários indica que para haver um aumento de área protegida, seria necessário alterar simultaneamente os parâmetros de altura e declividade média, todavia, o critério de declividade é mais limitante na classificação das áreas enquanto APPs. Entre os dois métodos testados para cálculo da declividade média, aquele onde se obtém a média dos valores dos pixels dentro dos limites dos morros resultou em maior área mapeada, em relação ao método onde a declividade foi calculada por linhas ligando o topo à linha de base dos morros. Conclui-se que há necessidade de regulamentação do artigo 4º da Lei 12.651/2012, no que tange a delimitação das APPs em topos de morros, pelas seguintes razões: subjetividade no cálculo da declividade média, ausência de referência para escala de mapeamento (que influencia na localização dos pontos de sela) e incompatibilidade dos parâmetros com as funções ambientais das áreas de preservação permanente.

ABSTRACT

OLIVEIRA, Guilherme de Castro, M. Sc. Universidade Federal de Viçosa, March, 2015. **Accuracy of Digital Terrain Models, automatic mapping of hill top PPAs and the effectiveness of the new brazilian Forest Code.** Adviser: Elpidio Inácio Fernandes Filho. Co-adviser: Márcio Rocha Francelino.

This research aimed to develop a methodology in a GIS environment, to automate the mapping of Permanent Preservation Areas (PPAs) on hilltops, reducing the costs involved in conventional mapping and making the process faster, and validate the databases that may be used. For such, we used Digital Elevation Models (DEMs) available free of charge in Brazil, which are: ASTER, SRTM, TOPODATA and IBGE. These DEMs were evaluated regarding their altimetric precision, given by the indexes: root mean squared error (RMSE), mean error (ME), Cartographic Accuracy Standard (PEC) and correlation of the derivatives of altitude (slope, direction of slope and curvature) with the reference, from the laser survey data with LIDAR system. The model used for mapping was developed in Model Builder programming environment, placed in ArcGIS 10.1. Finally, there was a analysis of section IX, Article 4 of Law 12.651/2012, putting in question its technical feasibility, the subjectivity points and the need for regulation. By scenario simulation, alternatives were searched for possible changes in Law. Among the evaluated DEMs, the one obtained from IBGE contour lines in scale 1:50,000 and vertical equidistance of 20 meters, showed better performance in all tests. The RMSE obtained with 500 checkpoints was 11.1; 13.9; 14.6 and 21.1 to IBGE, SRTM, ASTER and TOPODATA respectively. In the same order, EM was -1.3; 5.0; 10.5 and 4.7. The use of interpolation (Kriging, IDW, Spline and Topo To Raster) not provided significant improvements in accuracy of DEMs, therefore not justified its use in order to increase the resolution thereof. The local index of Moran (I), used for geostatistical analysis of the distribution of the DEMs estimation errors, indicated strong clustering of large estimate of deviations in all databases used, suggesting a correlation with geomorphological features or land cover. As regards the derivatives of altitude, there is a low correlation with the reference, especially in lower resolution DEMs, reinforcing the need for caution in application of DEMs and their derivatives in various purposes. There is a significant loss of information in the digital models of slope gradient, generated from DEMs with low resolution, which indicates that, in mountainous reliefs, high-resolution models must necessarily be used. Due to this loss of information, the value of the average slope criterion used to rate the PPAs on hilltops, should be given on the resolution of DEM used. The model for mapping has been

successfully developed in the form of a ArcToolbox tool, being able to process any DEM in a nine-stage processing. The final product is a geo vector file containing the PPA mapped in the form of polygons. Results showed that the changes introduced by the new Forest Code, in Brazil, virtually extinguished the PPAs in hilltops, when set the basis thereof by the dimension of the nearest saddle point of elevation and, simultaneously, require an average slope of 25 degrees and height greater than or equal to 100 m. Also, considering the saddle point as a divisor led to a strong geographical isolation of these areas and their reduction. The simulation shows that a protected area increase would require simultaneously change the parameters of height and average slope, however, the criterion of slope is more limiting in the classification of areas as PPAs. Between two methods used for calculating the average slope, that where we obtained the average of the pixels within the limits of the hills resulted in greater mapped area, compared to the method where the slope was calculated by lines connecting the top to the line base of the hills. It was concluded that there is need for regulation of Article 4 of Law 12.651/2012, regarding the delimitation of PPAs in hilltops, for the following reasons: subjectivity in the calculation of average slope, reference absence for mapping scale (which influences the location of the saddle points) and incompatibility of parameters with the environmental functions of permanent preservation areas.

INTRODUÇÃO GERAL

O mapeamento de Áreas de Preservação Permanente (APPs), entre outras áreas protegidas, é objeto de estudo desde a Lei 4.771/65, o Código Florestal, onde este conceito foi efetivamente instituído. Desde então, o advento e notável evolução dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) levou à possibilidade da delimitação automatizada e atraiu a atenção de diferentes grupos de pesquisa em todo o país, em virtude da celeridade dos procedimentos em laboratório, levando a uma significativa economia de recursos relacionados à obtenção de dados em campo, bem como maior padronização dos resultados e facilidade na transferência e armazenamento das informações georreferenciadas.

Diferentemente das demais APPs, aquelas situadas em topos de morros constituem um desafio para o mapeamento automático, em razão dos parâmetros que as definem. Por não se tratar de uma área delimitada por uma dimensão fixa pré-estabelecida, a exemplo das APPs em nascentes ou cursos d'água, torna-se necessária a execução de uma série de operações de geoprocessamento para sua delimitação em laboratório.

Anteriormente, a Lei 4771/1965 (BRASIL, 1965) considerava os topos de morros como APP e a Resolução 303/02 do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA dispunha de parâmetros, definições e limites para sua delimitação. Atendendo a essas especificações, Ribeiro et al. (2002) e Hott et al. (2005), entre outros autores, desenvolveram metodologias para o mapeamento automático das mesmas. Contudo, as alterações dos critérios para o mapeamento, trazidas pela Lei 12.651/2012 (BRASIL, 2012), o Novo Código Florestal (NCF), demandaram a elaboração de uma nova proposta metodológica, dado que a partir da nova lei os referidos métodos já não mais atendem os parâmetros para delimitação.

Uma primeira aproximação metodológica é apresentada em Oliveira & Fernandes Filho (2013), onde se objetivou traduzir as exigências legais em operações de geoprocessamento efetuadas em Modelos Digitais de Elevação (MDEs). Tendo alcançado significativo progresso nesta primeira aproximação da metodologia, surgiram outras questões de maior importância a serem consideradas neste projeto de pesquisa, no sentido de assegurar a viabilidade do uso desta no que tange os aspectos cartográficos e legais, possibilitando seu uso por agentes governamentais e iniciativa privada.

Há, ainda, a necessidade do estabelecimento de normas técnicas para a regulamentação do artigo, definindo escalas de mapeamento, metodologias específicas para as mensurações e limites aceitáveis de erro, temas que aqui serão

abordados. Todas as questões que levam à subjetividade na interpretação da Lei ferem o princípio da segurança jurídica, por esse motivo devem ser devidamente estudadas.

No que concerne à confiabilidade da metodologia de mapeamento automatizado, a maior incerteza paira sobre a precisão das bases de dados topográficos disponíveis para o território brasileiro, visto que a qualidade dos dados utilizados para alimentar o modelo interfere diretamente no resultado obtido. Desta forma, é preciso fazer, a priori, uma análise detalhada do desempenho dos modelos digitais de elevação (MDEs) disponíveis, aferindo sua precisão altimétrica, sua fidelidade na representação das feições do relevo, a distribuição espacial do erro de estimação e a propagação de erros nos derivativos da elevação.

Uma vez que se tem um modelo para o mapeamento automatizado, torna-se possível realizar simulação de cenários em relação aos parâmetros definidos em lei, permitindo um embasamento técnico para uma análise crítica da mesma. Ao mesmo tempo, viabiliza-se a comparação entre diferentes bases de dados e a verificação de sua aplicabilidade para essa finalidade específica.

Através de uma análise aprofundada, baseada em critérios técnicos, espera-se que os resultados dessa pesquisa contribuam para a elaboração de uma legislação mais condizente com a realidade técnica e ambiental do país.

Diante do exposto, o presente projeto de pesquisa teve como objetivos:

a) elaborar uma revisão do tema tratado pelo artigo 4º, inciso IX, da Lei 12.651/2012 (APPs em topos de morros), embasada em aspectos técnicos e jurídicos;

b) avaliar a precisão das bases de dados topográficos gratuitas disponíveis no território brasileiro, utilizando dados do sistema LIDAR como referência;

c) verificar a possibilidade de melhoria na precisão altimétrica dos MDEs através de interpolações, produzindo matrizes por refinamento;

d) desenvolver uma metodologia em ambiente ArcGIS 10.2 para delimitação automatizada de APPs em topos de morros e descrever a mesma de forma detalhada, possibilitando sua replicação;

e) verificar a viabilidade de uso dos modelos digitais de elevação no mapeamento das APPs de topos de morros, em um estudo de caso; discutir questões técnicas do mapeamento automático.

Capítulo 1

Áreas de Preservação Permanente em topos de morro no novo Código Florestal.

RESUMO – As Áreas de Preservação Permanente representam grande extensão em área protegida no Brasil, são localizadas nas propriedades públicas e privadas e possuem diferentes funções ecológicas. Apesar do cumprimento da Lei ser um dever dos proprietários, existe grande discussão em torno do tema, uma vez que a aplicação da mesma pode inviabilizar propriedades situadas em relevos mais movimentados. Assim, de um lado há a necessidade evidente da conservação das florestas e, de outro, a resistência do setor produtivo em perder áreas que, muitas vezes, são as melhores das propriedades. Entre as diferentes classes de APPs, estão aquelas situadas nos topos de morros, cujo entendimento e delimitação são historicamente problemáticos. Com o novo Código Florestal, o critério para delimitação das APPs em topos de morros foi reformulado, deixando a lei mais permissiva ao reduzir a extensão das mesmas, ou tornando mais difícil a inclusão de uma determinada área como APP. Apesar da evolução no tema, ao longo de décadas, questões que causam subjetividade na aplicação da Lei ainda existem na no NCF e fazer com que a redução nas áreas protegidas no Brasil seja ainda maior. Pelo exposto, o trabalho teve como objetivo fazer uma revisão do histórico das APPs no Brasil, com ênfase nas APPs em topos de morros, abordando aspectos técnicos e jurídicos do artigo. Existe a necessidade de regulamentação do artigo 4º, inciso IX, do NCF, visto que algumas questões práticas da delimitação dessas áreas ainda não são explícitas no Código.

Palavras-chave: APPS, topos de morros, novo Código Florestal

1. Introdução

Diante do cenário de degradação dos recursos naturais, é crescente a preocupação com a preservação dos remanescentes florestais no Brasil. Nesse contexto, as leis ambientais possuem importante papel, enquanto mantenedoras de uma vegetação que já se encontra escassa e fragmentada. Entre as Leis mais importantes no país, que tratam diretamente da conservação da flora, estão: Código Florestal (Brasil, 1965; Brasil 2012), Política Nacional do Meio Ambiente (Brasil, 1981), Lei da Mata Atlântica (Brasil, 2006), Lei de Crimes Ambientais (Brasil, 1996) e Lei de Política Agrícola (Brasil, 1991). No panorama internacional, o país é signatário de importantes tratados sobre o meio ambiente, como a Declaração do Rio de Janeiro sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (1992), o Protocolo de Kyoto (1997), a Convenção sobre Diversidade Biológica (1992), entre outros. O reconhecimento da importância das florestas e da biodiversidade existe e é firmado através de Leis e Tratados. Há, todavia, uma enorme distância entre as metas estabelecidas para conservação e a realidade, o que demanda um grande esforço de toda a sociedade.

No Brasil, a responsabilidade da preservação das florestas é compartilhada entre o Estado e a sociedade. Assim, existem áreas protegidas que são geridas pelos entes federativos, a exemplo das Unidades de Conservação (UCs), e também aquelas que estão inseridas no patrimônio privado, majoritariamente nas propriedades rurais do país, como as RPPNs (Reserva Particular do Patrimônio Natural). Com o Código Florestal (CF), Lei 4.771/65 (Brasil, 1965), as áreas consideradas mais frágeis, ou importantes para o meio ambiente, passaram a ter uso limitado nas propriedades rurais. Foi a primeira vez, na história do país, que o Estado interferiu na forma que os produtores rurais deveriam utilizar a propriedade, ao proibir ou dificultar o uso de determinados locais. No CF foram criados dois institutos: a Reserva Legal (RL) e as Áreas de Preservação Permanente (APPs). A RL é uma fração da propriedade que deve ser mantida com a vegetação florestal, nativa ou exótica, que pode ser explorado dentro de um limite de extração anual. Já as APPs são locais que não deverão ser destinados à produção, sendo ali mantida a vegetação nativa que servirá à proteção de sítios mais frágeis na paisagem, a saber: margens de cursos d'água, nascentes, encostas, topos de morros, bordas de tabuleiros e chapadas, veredas, manguezais, restingas e áreas com altitude superior a 1800m.

O novo Código Florestal, Lei 12.651/2012, foi alvo de muitas críticas por ambientalistas, uma vez que foi tido como permissivo, ao não punir aqueles que

havia desmatado irregularmente, no passado. Entretanto, um dos pontos mais importantes do NCF não foi discutido pela sociedade. A alteração nos critérios para delimitação das APPs em topos de morros (Oliveira & Fernandes Filho, 2013; Francelino & Silva, 2014), embora sutil na redação da Lei, é responsável, possivelmente, pela maior perda de área legalmente protegida no Brasil.

Diante do exposto, o presente trabalho teve como objetivo realizar um levantamento do histórico das APPs no Brasil, com ênfase nas APPs em topos de morros, na importância da proteção dessas áreas e na dificuldade técnica da delimitação das mesmas.

2. Materiais e métodos

O presente trabalho consiste em uma revisão do histórico das APPs no Brasil, focando-se naquelas situadas em topos de morros. Através desse levantamento, buscou-se abordar a importância dessas áreas, bem como o significado prático das alterações trazidas pelo novo Código Florestal, Lei 12.651/2012 no que tange o tema das APPs em topos de morros.

3. Discussão

3.1 Áreas de Preservação Permanente

Instituídas no Código Florestal de 1964 (Lei 4771/65), as Áreas de Preservação Permanente têm a função de preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica, a biodiversidade, o fluxo gênico de fauna e flora, proteger o solo e assegurar o bem-estar das populações humanas. Como destaca Carvalho (2013), a função das APPs, em sua origem, mais ligada à proteção dos recursos hídricos e do solo, fora consideravelmente ampliada ao longo dos anos de vigência da lei e hoje possui tão difícil e ampla incumbência. Observa-se, contudo, que o texto deve ser interpretado com mais ponderação. Até mesmo porque para garantir esta ampla função, os parâmetros estipulados para APP deveriam ser consideravelmente maiores, na medida em que 30 metros ao longo do curso d'água, por exemplo, é insuficiente para garantia do fluxo gênico da fauna e flora.

No entanto, a redação original da referida lei não tratava de Áreas de Preservação Permanente, mas de Vegetação de Preservação Permanente, como pontuam Silva (2011) e Felipe (2005), pois o Artigo 2º possuía a seguinte redação: “Art. 2º Consideram-se de preservação permanente, pelo só efeito desta Lei, as *florestas e demais formas de vegetação natural situadas(...)*”. Na alteração da

redação dessa lei pela Lei 7.803/89, 23 anos após o decreto que promulgou o Código Florestal, esse tema não foi alterado. Na resolução CONAMA 303, de 20 de março de 2002, foram consideradas as áreas de preservação e não somente a vegetação ali localizada. Embora seja uma diferença sutil, é bastante importante quando da aplicação da Lei no caso concreto. Por exemplo, atualmente uma pastagem localizada nas margens de um rio é considerada APP, ainda que sob uso consolidado. No passado, pela interpretação mais pura da lei, era considerada de preservação somente a vegetação natural ali estabelecida, caso houvesse, sendo livre o uso das áreas que já estavam convertidas para o uso alternativo do solo. Entretanto, apesar de não expresso na lei, a maioria jurisprudencial e doutrinária entendia que a vegetação nativa deveria sim ser recomposta (Carvalho, 2003). A diferença é que, ao se falar em “área” de preservação permanente, se essa área naturalmente não era coberta por florestas, ela, hoje, encontra-se protegida da mesma forma que aquelas cobertas por florestas.

A Resolução CONAMA 303/02 também definiu os critérios para mapeamento das APPs, além dos conceitos de morro, monte, montanhas e serras. Ao definir limites para delimitação das APPs, a Resolução passa a considerar toda a área como sendo de preservação permanente, e não somente a vegetação natural. Ainda que o referido órgão colegiado tenha regrado e normatizado muitas vezes além de sua competência (Felipe, 2005), a resolução foi aplicada em todo o Brasil até o ano de 2012, quando entrou em vigor o novo código florestal (NCF). A falta de clareza, bem como ambiguidade nas interpretações dos termos da legislação a torna enfraquecida, na medida em que dificulta sua aplicação (Silva et al., 2011).

O novo Código Florestal, lei 12.651/12, abarca tanto o conceito de APPs quanto os parâmetros para seu mapeamento e o regime de utilização dessas áreas, fazendo desta forma uma compilação de uma legislação anteriormente fragmentada bastante alterada por medidas provisórias, disposta em diferentes leis e normativas. Se por um lado as informações são reunidas, facilitando o entendimento da lei por completo, por outro a torna mais rígida, reduzindo as possibilidades de alteração no futuro.

O NCF exige que a vegetação situada nas APPs seja mantida pelo proprietário. Em caso de ter ocorrido supressão nesses locais, o mesmo está obrigado a promover a recomposição em faixas definidas na lei, de acordo com alguns critérios tais como o tamanho da propriedade quanto aos módulos fiscais, largura do curso d'água, entre outros. Ainda, o NCF autoriza a supressão das APPs somente em casos de utilidade pública, de interesse social ou a intervenção de baixo impacto ambiental, definidas como:

“Art. 3º Para os efeitos desta Lei, entende-se por:

(...)

“X - atividades eventuais ou de baixo impacto ambiental:

- a) abertura de pequenas vias de acesso interno e suas pontes e *pontilhões, quando necessárias à travessia de um curso d'água, ao acesso de pessoas e animais para a obtenção de água ou à retirada de produtos oriundos das atividades de manejo agroflorestal sustentável;*
- b) implantação de instalações necessárias à captação e condução de água e efluentes tratados, desde que comprovada a outorga do direito de uso da água, quando couber;
- c) implantação de trilhas para o desenvolvimento do ecoturismo;
- d) construção de rampa de lançamento de barcos e pequeno ancoradouro;
- e) construção de moradia de agricultores familiares, remanescentes de comunidades quilombolas e outras populações extrativistas e tradicionais em áreas rurais, onde o abastecimento de água se dê pelo esforço próprio dos moradores;
- f) construção e manutenção de cercas na propriedade;
- g) pesquisa científica relativa a recursos ambientais, respeitados outros requisitos previstos na legislação aplicável;
- h) coleta de produtos não madeireiros para fins de subsistência e produção de mudas, como sementes, castanhas e frutos, respeitada a legislação específica de acesso a recursos genéticos;
- i) plantio de espécies nativas produtoras de frutos, sementes, castanhas e outros produtos vegetais, desde que não implique supressão da vegetação existente nem prejudique a função ambiental da área;
- j) exploração agroflorestal e manejo florestal sustentável, comunitário e familiar, incluindo a extração de produtos florestais não madeireiros, desde que não descaracterizem a cobertura vegetal nativa existente nem prejudiquem a função ambiental da área;
- k) outras ações ou atividades similares, reconhecidas como eventuais e de baixo impacto ambiental em ato do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA ou dos Conselhos Estaduais de Meio Ambiente;

(BRASIL, 2012)

Percebe-se que, ao contrário do que julga o senso comum, as APPs não são intocáveis, tampouco são áreas perdidas na propriedade rural. Há a possibilidade de seu uso econômico por parte dos proprietários. O que se faz necessário é, portanto, uma mudança do paradigma de ocupação da paisagem, do uso da terra, e do entendimento das florestas como fonte alternativa de renda para os produtores, da mesma forma que qualquer cultura agrícola. É permitido, por exemplo, o Manejo Florestal Sustentável (MFS). O Ministério do Meio Ambiente (MMA) define que o

MFS é “a administração da floresta para obtenção de benefícios econômicos, sociais e ambientais, respeitando-se os mecanismos de sustentação do ecossistema objeto do manejo e considerando-se, cumulativa ou alternativamente, a utilização de múltiplas espécies madeireiras, de múltiplos produtos e subprodutos não-madeireiros, bem como a utilização de outros bens e serviços florestais” (MMA, [http://www.mma.gov.br/florestas/manejo-florestal-sustentável](http://www.mma.gov.br/florestas/manejo-florestal-sustentavel)).

Os produtos florestais não madeireiros (PFNM), por exemplo, incluem produtos como: sementes, plantas medicinais, fibras, resinas, tipos de látex, óleos, gomas, frutas, castanhas, condimentos, tinturas, rattan, bambu etc. (Serviço Florestal Brasileiro, <http://www.florestal.gov.br/florestas-comunitarias/produtos-florestais-nao-madeireiros/manejo-de-produtos-florestais-nao-madeireiros-pfnm>).

Por fim, não necessariamente a produção agrícola deve ser valorizada em detrimento da preservação dos recursos naturais, ou vice-versa. É possível que as duas finalidades coexistam de forma harmônica.

3.2 Áreas de Preservação Permanente em topos de morros

A importância das APPs em topos de morros abrange aspectos sociais, econômicos e ambientais. As florestas preservadas nos topos de morros possuem função hidrológica, na medida em que reduzem a energia cinética da água de escoamento superficial, reduzindo seu potencial erosivo ao longo das encostas. Além disso, favorece a infiltração de água nas principais áreas de recarga dos aquíferos, onde os solos são mais profundos. Do ponto de vista social, as APPs em topos de morros, através da estabilização das encostas, reduzem os riscos de “desastres naturais” que muitas vezes são fatais, como os escorregamentos em áreas urbanas. Graff et al. (2012) mostram que as raízes tem grande importância na estabilização de encostas e que a substituição de florestas por gramíneas ou vegetação herbácea nessas áreas é prejudicial para sua estabilização. Além do efeito físico de contenção, as florestas têm contribuição importante na transpiração, reduzindo a umidade do solo.

Quanto à sua importância ambiental, os habitats presentes nos topos de morros têm particularidades em função de sua posição topográfica e conectividade, favorecendo o endemismo ou a distribuição diferenciada dos organismos. Tabarelli & Mantovani (1997) estudaram clareiras naturais situadas em topos de morros da floresta atlântica e mostram que a composição florística é diferente nesses locais, sendo o habitat preferencial de espécies como *Ilex theezans* (orelha-de-mico), *Miconia pyrifolia* (papa-terra) e *Miconia latecrenata*, as quais ocorrem em florestas abertas em topos de morros, como a floresta nebulosa. Ribeiro & Freitas (2010)

apontaram os impactos potenciais do NCF na vegetação de campos rupestres e campos de altitude, sobretudo quanto à perda da biodiversidade. Os topos de morros são locais de encontro de borboletas para acasalamento (Baker 1983, citado por Freitas, 2010), sendo ambientes importantes para a manutenção de processos diversos ligados ao reconhecimento intraespecífico, corte e acasalamento. Além disso, muitas espécies desse grupo são encontradas somente nesses locais.

As áreas de elevada altitude, bem como serras e topos de morros, são regiões de alto endemismo para anfíbios no mundo e também no Brasil, seja por condições climáticas específicas ou por questões relativas a barreiras geográficas (Cruz & Feio 2007). Essas áreas também têm grande importância para os mamíferos, pois abrigam uma alta diversidade de espécies endêmicas, bem como servem de trampolins ecológicos e corredores para outras espécies. A redução nas APPs em topos de morros, segundo Galetti et al. (2010), afeta diretamente as espécies *Callithrix aurita* (sagüi da serra), *Mazama nana* (veado-mão-curta), *Mazama bororo* (veado-mateiro-pequeno) e *Tayassu pecari* (queixada), as quais dependem desses habitats em maior ou menor grau e são ameaçadas de extinção. Uma série de espécies de pássaros também é endêmica das regiões montanhosas (Vasconcelos, 2013).

O conflito entre as APPs em topos de morros e a atividade agropecuária não pode ser generalizado, uma vez que está associado à imposição da própria geomorfologia regional e ao processo histórico de ocupação. Por isso, há regiões onde essas áreas são muito bem preservadas com matas nativas, sobretudo naquelas onde os topos de morros representam os locais de menor fertilidade natural e umidade do solo, de acesso mais intrincado e não mecanizáveis. Esse é o caso de grande parte da Zona da Mata mineira. Por exemplo, na região do município de Viçosa, a monocultura do café levou ao desmatamento quase total das fazendas, restando somente as matas nos topos dos morros e nas encostas muito íngremes, as quais foram utilizadas para o extrativismo (Paniago, 1983). Esse padrão também é observado por Jacovine et al. (2008) na bacia do Rio Pomba (MG), onde a vegetação nativa das propriedades se resume a fragmentos localizados nos topos de morros. No outro extremo, regiões de relevo mais suave possuem os topos de morros ocupados pela atividade humana, pois a possibilidade de mecanização favorece atividade agrícola. Reis et al. (2012) mostram que as áreas de preservação permanente em topos de morro (segundo a Lei pretérita) no município de Lavras, sul de Minas Gerais, eram em maior parte ocupadas por pastagens e agricultura. De forma geral, a aptidão do solo ao uso agrícola é o que define maior ou menor grau de conflito nessas áreas (Luís et al., 2006). Além da agropecuária, a mineração é

uma atividade que apresenta notável conflito com as APPs em topos de morros (Silva, 2011), ainda que distribuída pontualmente no território.

3.3 Mapeamento das APPs em topos de morros

No caso específico das APPs em topos de morros, não havia critérios para mapeamento das mesmas até o ano de 2002, fato que levou a uma grande insegurança jurídica, o que, infelizmente, não foi solucionado com a resolução CONAMA 303/02, uma vez que as definições trazidas pela mesma eram ainda bastante controversas, ocasionando dúvidas mesmo para analistas mais experientes. De fato, a criação de um Grupo de Trabalho pelo MMA, para discussão dos critérios de delimitação das APPs em topos de morros, bem como as dezenas de propostas e manifestos a respeito dessa questão, confirmam a complexidade do tema. A redação da Resolução 303/02 CONAMA traz:

“Art. 2º Para os efeitos desta Resolução, são adotadas as seguintes definições:

(...)

“IV - morro: elevação do terreno com cota do topo em relação à base entre cinquenta e trezentos metros e encostas com declividade superior a trinta por cento (aproximadamente dezessete graus) na linha de maior declividade;

V - montanha: elevação do terreno com cota em relação à base superior a trezentos metros;

VI - base de morro ou montanha: plano horizontal definido por planície ou superfície de lençol d'água adjacente ou, nos relevos ondulados, pela cota da depressão mais baixa ao seu redor.”

O termo ‘topo’ se refere ao terço superior do morro em relação à base, que por sua vez é de difícil delimitação, pois a localização do sopé da encosta é variável em razão da escala da carta topográfica utilizada (Silva et al., 2011). Ainda, a base do morro poderia ser interpretada de duas formas: a primeira estaria associada à planície ou a superfície do lençol d'água adjacente à elevação e a segunda seria a cota de depressão mais baixa ao redor do morro (Borges, 2008). De acordo com o autor, a segunda forma seria mais apropriada, pois se evita que sejam consideradas cotas muito baixas, causando aumento excessivo das APPs em topos de morros. Todavia, as atas das reuniões realizadas para o esclarecimento dessas questões, disponibilizadas pelo CONAMA (<http://www.mma.gov.br/port/conama/>), deixam claro que a interpretação da base do morro não deveria considerar os pontos de sela: “Ficou estabelecido, nesta oportunidade, que, nos relevos ondulados, a base do morro ou montanha é a cota altimétrica da depressão mais

baixa ao seu redor. Reafirmou-se o consenso de que não devem ser utilizados os critérios que consideram as zonas de sela como cota-base.” (Ofício nº895/2008, CAO,-MP/SP)

A resolução do CONAMA ainda definia os critérios a serem adotados no mapeamento das APPs em topos de morros:

“Art. 3º Constitui Área de Preservação Permanente a área situada:

(...)

V - no topo de morros e montanhas, em áreas delimitadas a partir da curva de nível correspondente a dois terços da altura mínima da elevação em relação a base;

VI - nas linhas de cumeada, em área delimitada a partir da curva de nível correspondente a dois terços da altura, em relação à base, do pico mais baixo da cumeada, fixando-se a curva de nível para cada segmento da linha de cumeada equivalente a mil metros;

(...)

Parágrafo único. Na ocorrência de dois ou mais morros ou montanhas cujos cumes estejam separados entre si por distâncias inferiores a quinhentos metros, a Área de Preservação Permanente abrangerá o conjunto de morros ou montanhas, delimitada a partir da curva de nível correspondente a dois terços da altura em relação à base do morro ou montanha de menor altura do conjunto, aplicando-se o que segue:

I - agrupam-se os morros ou montanhas cuja proximidade seja de até quinhentos metros entre seus topos;

II - identifica-se o menor morro ou montanha;

III - traça-se uma linha na curva de nível correspondente a dois terços deste; e

IV - considera-se de preservação permanente toda a área acima deste nível.”

Assim, segundo as definições dessa resolução, era preciso agrupar morros que estavam a menos de 500 metros de distância, o que atualmente não é mais necessário. Além dos topos de morros, também eram consideradas APPs as “linhas de cumeada”, termo que por sua vez se tornou bastante inapropriado, por não ter qualquer referência técnica da literatura geológica ou geomorfológica que o defina com exatidão. A resolução CONAMA 303/02 definia o conceito de linha de cumeada da seguinte forma, em seu artigo 2º, inciso VII: “linha de cumeada: linha que une os pontos mais altos de uma seqüência de morros ou de montanhas, constituindo-se no divisor de águas”. A noção empírica de que a linha de cumeada constitui divisores de bacias é bastante simplória e de difícil aplicação do ponto de vista prático. Borges (2008) defende que apesar dos questionamentos, a resolução

CONAMA 303/02 cumpre seu objetivo: dispor de parâmetros, definições e limites para as APPs.

Durante a formulação do Novo Código Florestal, foi discutida a possibilidade de exclusão das APPs em topos de morros (Sparovek et al., 2011), considerando a grande extensão ocupada pelas mesmas, sobretudo em propriedades localizadas em relevos movimentados, o interesse de alguns setores do agronegócio em utilizar essas áreas e a falta de critérios técnicos para sua delimitação. Dada a celeuma criada em torno do tema nas audiências públicas, concluiu-se, não pela exclusão da referida APP, mas pela alteração de seus parâmetros. Há quem defenda que o formalismo lingüístico utilizado pelo legislador é uma forma, através da hermenêutica, de criar brechas na lei sem causar polêmica (Borges, 2008). Para Coutinho (2013), a alteração possui um aspecto positivo no sentido de que a ampliação da altura do morro, de 50 para 100 metros, é mais coerente com a literatura técnico/científica. Por outro lado, o aumento da declividade é negativo uma vez que muitos desastres naturais ocorrem em declividades abaixo da estabelecida pelo NCF.

Em síntese, muitas áreas vulneráveis (encostas e topos de morros) deixam de ser legalmente protegidas pelo NCF, deixando a responsabilidade da sua proteção para outras Leis e os entes federativos. A Lei da Mata Atlântica (Brasil, 2006), por exemplo, proíbe o corte sem autorização em toda extensão do bioma. Todavia, enquanto a possibilidade de conversão depende da anuência do órgão ambiental responsável, na prática, há redução do amparo legal para essas áreas.

Silva et al. (2011) argumentam que já existem meios técnicos para uma classificação mais apurada dos solos mais frágeis, passando de uma definição geomorfológica pouco acurada para um parâmetro quantitativo preciso, modelado em sistemas computacionais e baseado em parâmetros hidrológicos, como a profundidade do lençol freático, a exemplo do modelo HAND (Nobre et al., 2011). Todavia, esses procedimentos levam a resultados a nível regional, impossibilitando a criação de uma norma aplicável em todo o território brasileiro, o que na verdade seria mais adequado por considerar as particularidades edafológicas, geológicas e geomorfológicas localmente.

A redação do NCF, no que tange a delimitação de APPs em topos de morros, traz:

*“Art. 4º Considera-se Área de Preservação Permanente, em zonas rurais ou urbanas, para os efeitos desta Lei:
(...)”*

IX - no topo de morros, montes, montanhas e serras, com altura mínima de 100 (cem) metros e inclinação média maior que 25°, as áreas delimitadas a partir da curva de nível correspondente a 2/3 (dois terços) da altura mínima da elevação sempre em relação à base, sendo esta definida pelo plano horizontal determinado por *planície ou espelho d'água adjacente ou, nos relevos ondulados, pela cota do ponto de sela mais próximo da elevação;*”

(BRASIL, 2012)

Comparando-se o texto do NCF com a legislação anterior, percebe-se que o conceito foi relativamente simplificado, uma vez que as linhas de cumeada foram extintas e não há mais diferenciação entre morros, montanhas e serras, as quais foram agrupadas como APPs em topos de morros. Mesmo assim, a compreensão do artigo ainda é bastante complexa. Os critérios para delimitação dos morros também foram alterados: enquanto a legislação pretérita definia declividades acima de 17 graus na encosta de maior declividade e altura superior a 50 metros, o NCF exige declividade média superior a 25 graus e altura superior a 100 metros. Outra alteração de grande importância é quanto à definição da base do morro, que agora passa a ser a cota do ponto de sela mais próximo da elevação, nos relevos ondulados.

Se de alguma forma a subjetividade na delimitação da base é relativamente reduzida, por outro lado, considerar o ponto de sela como base do morro não guarda qualquer coerência com a função ou objetivo das dessas APPs, visto que ainda que o terço superior de um morro seja considerado como APP, sua área será bastante reduzida e não estará conectada às outras áreas protegidas adjacentes a ela, mesmo que dois topos de morros vizinhos sejam APPs. Em termos práticos, é muito raro que uma elevação tenha altura superior a 100 metros e, simultaneamente, declividade média superior a 25 graus, considerando a cota do ponto de sela como base do mesmo. Como consequência, atualmente a probabilidade de uma elevação qualquer na paisagem ser classificada como “morro”, segundo a lei, é bastante remota, sobretudo em relevos menos movimentados. Essas mudanças, conjuntamente, causaram grande redução nas áreas protegidas enquanto APPs em topos de morros (Oliveira & Fernandes Filho, 2012).

O NCF falha ao tentar definir normas de conteúdo bastante específico, por meio da parametrização, em uma Lei que deveria se ater a normas gerais. Assim, não possui a especificidade esperada em uma normativa, tampouco a abrangência esperada em uma Lei Federal que trate de um tema tão diverso em um país como o

Brasil, tornando a mesma enfraquecida. Há pelo menos dois pontos em específico que o NCF deixou em aberto: (a) a definição do método a ser utilizado para mensuração da declividade, bem como quantas medidas deverão ser feitas para se obter uma média e (b) a escala em que o mapeamento deve ser feito, o que influencia na localização dos pontos de sela. Esses aspectos, que podem influenciar o resultado dos mapeamentos, serão discutidos com maior profundidade ao longo da dissertação.

3.4 Regulamentação do inciso IX, artigo 4º da Lei 12.651/2012

Diante da complexidade inerente ao mapeamento das APPs em topos de morros, o mesmo se torna inviável com base em dados de campo, considerando o tempo e o custo necessário para tal. Além disso, pela inexistência de uma metodologia padronizada para o mapeamento, uma área incomensurável que deveria ser preservada, em todo o território brasileiro, deixa de ser considerada no Cadastro Ambiental Rural (CAR), enquanto o mesmo não contempla as APPs em topos de morros. Há risco de que os proprietários não declarem essas APPs e, por falta de uma referência do Ministério do Meio Ambiente, essas omissões não sejam detectadas, levando a uma maior permissividade no uso dessas áreas.

Desta forma, é urgente a regulamentação do inciso IX, artigo 4º do NCF, bem como o estabelecimento de uma metodologia padronizada para o mapeamento. Nesse sentido, o Instituto Estadual do Meio Ambiente do Estado do Rio de Janeiro (INEA-RJ) foi o primeiro órgão ambiental do Brasil a considerar essas questões, através da Resolução INEA nº93 de 24 de outubro de 2014.

Essa resolução foi baseada, principalmente, nas seguintes considerações: a) “a impossibilidade de se demarcar, de imediato, todas as áreas de preservação permanente com base em dados de campo”, b) “a necessidade de se estabelecer uma metodologia única para a delimitação de áreas de preservação de topo de morro, para assegurar o princípio da segurança jurídica”, c) “*que a metodologia deve consistir de procedimentos automatizados, para evitar a subjetividade*”, d) “que a representação cartográfica de fé pública com maior detalhamento, disponível para todo o Estado do Rio de Janeiro, é a Base Cartográfica IBGE/SEA na escala 1:25.000”.

Entre as principais definições trazidas pela Resolução, estão: a padronização da base de dados cartográficos a ser utilizada, o conceito de base do morro e o método de cálculo da declividade média. De forma genérica, a Resolução ainda sugere uma metodologia para delimitação em SIG:

“Art. 5º Serão adotados os seguintes procedimentos, para a delimitação de áreas de preservação de topo de morro:

a) elaboração de modelo digital de elevação (MDE) hidrologicamente correto, a partir da Base Cartográfica, adotando tamanho de célula adequado à escala; no caso da Base Cartográfica IBGE/SEA 1:25.000 deve ser 10m;

b) inversão do modelo digital de elevação;

c) delimitação das depressões a partir do modelo digital de elevação invertido, para obtenção das áreas de escoamento superficial (AESF) que correspondem aos morros, montanhas e serras;

d) cálculo da altura do morro, por diferença entre a célula com o valor mais alto de elevação (topo) e a célula com o valor mais baixo (base do morro), para cada AESF;

e) cálculo da declividade a partir da maior diferença de elevação de uma célula em relação aos seus vizinhos imediatos, com base no modelo digital de elevação;

f) cálculo da inclinação média, que consistirá na soma dos valores de declividade de todas as células da AESF, dividida pelo número total de células;

h) as áreas de preservação permanente de topo de morro serão calculadas para as AESF que conjugarem altura superior a 100 m e inclinação média maior que 25°, a partir da diferença entre a célula com maior valor de elevação (topo) e o *valor correspondente a 1/3 da altura em cada AESF.*”

Resolução INEA Nº 93 de 24 de outubro de 2014.

A resolução define, ainda, que o ponto de sela não será utilizado como referência no estado do Rio de Janeiro e que a base do morro passa a ser definida como “altitude do ponto a partir do qual a erosão das águas correntes não pode trabalhar”. Funda com isso um novo conceito: a área de escoamento superficial da feição (AESF), por ela definida como “toda a superfície de escoamento das águas superficiais, do topo até a base”. Embora ainda não haja resultados com essa metodologia, a subjetividade na definição da base pode ser problemática para construção de um modelo metodológico automatizado.

Ao deliberar que um modelo digital de elevação com 10 metros de resolução deve ser elaborado, a partir dos dados cartográficos estabelecidos como

padrão, a Resolução INEA N° 93 representa um avanço no tema, ao trabalhar pontos específicos de grande subjetividade no mapeamento das APPs em topos de morros. Embora seja um exemplo a ser seguido enquanto regulamentação, a Resolução não possui força de lei. Tampouco, os resultados da metodologia proposta foram divulgados para apreciação, até o momento. Há necessidade, portanto, de um estudo mais aprofundado, onde os mapeamentos sejam discutidos e os critérios testados em simulações, de forma a estabelecer uma regulamentação consistente e adequada para a função das APPs em topos de morros.

4. Conclusões

As APPs em topos de morros apresentam importantes funções ecológicas e sociais. Em algumas regiões, sobretudo as de relevo mais movimentado, essas áreas representam a maior parte dos remanescentes florestais na paisagem, o que reforça a necessidade da manutenção desse instituto. As florestas localizadas em topos de morros, que não são mais APPs, ainda estão protegidas pela Lei da Mata Atlântica. Todavia, as áreas que foram desmatadas ilegalmente e convertidas a uso alternativo estão desobrigadas da recomposição, representando um prejuízo para aqueles que cumpriram a legislação anterior.

O NCF reuniu os critérios para delimitação das APPs numa única lei, tornando seu entendimento relativamente mais simples. Por outro lado, falha pelo excesso, ao tentar regulamentar além das normas gerais, esperadas em uma Lei Federal. As alterações dadas para os critérios de declividade e altura dos morros, tornam o NCF mais permissivo para o uso alternativo do solo, enquanto reduz a área protegida enquanto APP de topos de morros.

Embora a alteração na questão dos topos de morro tenha sido, possivelmente, o maior impacto do NCF pela redução de área legalmente protegida, a sociedade sequer discutiu o tema. A mídia, por sua vez, não expôs o assunto ou realizou qualquer investigação de caráter técnico, a exemplo da atenção e enfoque que foram dados para outros temas mais polêmicos.

Há, pelo menos, duas fontes de subjetividade na interpretação do artigo 4º, inciso IX, do NCF: a forma de cálculo da declividade média e a escala de referência para o mapeamento. Essas questões foram tratadas na recente Resolução N° 93/2014 do Instituto Estadual do Meio Ambiente do estado do Rio de Janeiro, a qual poderá ser utilizada como uma referência para elaboração de uma regulamentação futura.

Capítulo 2

Avaliação da qualidade de modelos digitais de elevação gratuitos no Brasil, usando dados LIDAR como referência.

RESUMO - Os modelos digitais de elevação (MDEs) são representações numéricas do relevo, amplamente utilizados nos mais diversos braços das geociências. No Brasil, em muitos casos, os MDEs gerados a partir de dados de sensoriamento remoto são a única opção disponível para mapeamentos sistemáticos. Enquanto modelos, ou aproximações da realidade, os MDEs estão sujeitos a erros e incertezas, os quais se propagam através dos produtos derivados dos mesmos, prejudicando a qualidade das informações. A verificação da precisão dos modelos é chamada validação, onde uma fonte externa de dados, necessariamente com maior precisão, é utilizada para mensurar os erros de estimativa de um modelo menos preciso. No caso da validação de MDEs, a maioria dos trabalhos normalmente se depara com dois empecilhos: a) determinar estatisticamente um tamanho amostral adequado para validar os MDEs e, b) conseguir obter em campo tamanho volume de dados. A dificuldade de obtenção de um número adequado de pontos de checagem, com alta precisão, é solucionada com o advento do sistema LIDAR, usado no trabalho. Diante do exposto, o presente artigo teve como objetivos: determinar um tamanho amostral adequado para validação dos MDEs disponíveis gratuitamente no território brasileiro (IBGE 1:50.000, ASTER GDEM v2, SRTM e TOPODATA), avaliar a qualidade desses modelos sob diferentes critérios estatísticos e geoestatísticos, verificar a relação dos erros com a variação do terreno e a propagação dos erros pelos derivativos da superfície (declividade, face de exposição e curvatura). A área de estudo é uma cena de 10x10km, em região de relevo acidentado, localizado entre os municípios de Santa Bárbara e Barão de Cocais (MG). Os resultados mostram a importância do uso de um número adequado de pontos, na medida em que baixas densidades amostrais não captam a variabilidade dos erros nos MDEs. O MDE IBGE com 10m de resolução, produzido através cartas topográficas na escala 1:50.000, apresentou melhor desempenho em todos critérios avaliados. A declividade do terreno está associada a maiores valores médios de erros absolutos, áreas mais inclinadas estão sujeitas a maiores erros de estimativa, em todos modelos avaliados. A baixa correlação observada nos derivativos da superfície confirma a propagação da incerteza na modelagem do terreno. Os erros de estimativa apresentaram distribuição espacial fortemente agrupada, com clusters de altos valores associados à locais de maior complexidade do terreno.

Palavras-chave: Validação, MDE, LIDAR

1. Introdução

A modelagem digital do terreno pode ser definida como um sistema de métodos quantitativos, para analisar e modelar a superfície da terra e as relações entre a topografia e componentes geológicos, hidrológicos, biológicos e antropogênicos da paisagem (Florinsky, 2002). É resultado da integração de conhecimentos, princípios e métodos das ciências da terra e da computação (Pike, 2000). Os modelos digitais de terreno, a exemplo dos modelos digitais de elevação (MDEs), modelos digitais de declividade (MDD), entre outros, são representações numéricas de uma variável morfométrica que define a superfície topográfica e são geralmente representados na forma de matrizes numéricas contendo grande volume de informação. Cada observação é contida em uma célula (pixel) de uma matriz e representa uma estimativa daquela variável em um ponto do espaço geográfico ou a sua média na área relativa à célula. No caso dos modelos digitais de elevação, a informação contida nessas matrizes é a altitude. Os MDEs estão entre as primeiras formas de informação geográfica digital disponível e atualmente são amplamente utilizados para uma série de finalidades (Fisher & Tate, 2006), sendo majoritariamente aplicados na modelagem do terreno, visualização de mapas e modelagem hidrológica (Wechsler, 2003). Além da representação na forma de matrizes, os dados de elevação também podem ser armazenados como pontos, redes triangulares regulares ou curvas de nível vetorizadas (Zhang & Montgomery, 1994). Cada formato apresenta vantagens e desvantagens dependendo da sua aplicação, todavia a forma matricial é a mais utilizada.

Os modelos digitais de elevação da superfície da terra podem ser gerados a partir de dados obtidos em diferentes técnicas de campo, laboratório e sensoriamento remoto. Entre as mais importantes para a ciência do solo estão os levantamentos topográficos convencionais, levantamentos cinemáticos com GPS, fotogrametria (analógica e digital), interferometria de radar e levantamento a laser. A escolha da técnica utilizada dependerá da escala de mapeamento, tamanho da área de estudo, precisão e resolução requerida do MDE, bem como dos outros mapas a serem utilizados e do custo envolvido na elaboração (Florinsky, 2011).

O volume de dados de um MDE aumenta exponencialmente com a sua resolução. Resoluções mais apuradas (menor tamanho de célula) requerem maior capacidade de processamento do hardware, bem como maior capacidade de armazenamento de dados, o que se traduz em maiores custos e tempo de processamento. Considerando que um grande volume de dados pode conter redundâncias, o mais adequado seria utilizar a resolução mais baixa que atenda a

precisão requerida para a aplicação em questão. Por esta razão, têm se justificado a iniciativa de inúmeros estudos, que avaliam a resolução dos MDEs em relação a sua precisão ou adequabilidade em diferentes aplicações.

Os modelos digitais de elevação são amplamente empregados em diversos ramos das Ciências da Terra. Em quaisquer estudos onde a topografia é um fator a ser modelado, os MDEs permitem a extração de atributos primários ou secundários derivados da altitude como declividade, face de exposição, concavidade, direção de escoamento, entre outros. Esses dados, obtidos a partir dos MDEs, são utilizados na predição de outros atributos como umidade do solo, teor de C orgânico, radiação solar incidente e teor de argila.

A topografia é relacionada com processos pedogenéticos (Florinsky et al., 2002), e por essa razão esses modelos são vastamente utilizados no mapeamento digital de solos (MDS). As variáveis: elevação, declividade e curvatura, explicam em grande parte a variabilidade dos solos e de seus atributos em uma área e por esta razão são eficientes no mapeamento de propriedades dos solos ou na delimitação de unidades amostrais (Odeh et al., 1991; Florinsky et al., 2002; Sirtoli et al., 2008; Chagas et al., 2010, Teske et al., 2014).

Os MDEs obtidos por sensoriamento remoto são boas opções para locais onde há ausência de um levantamento sistemático de maior precisão, como é o caso da Amazônia brasileira, onde muitos trabalhos se dedicaram a buscar alternativas para produção de uma base cartográfica adequada, ou sua atualização (Santos et al (2006), Miceli et al.(2011), Oliveira & Paradella (2009)).

Existem diferentes modelos matriciais que representam a superfície da Terra, os quais se distinguem quanto a sua natureza. Os Modelos Digitais de Elevação (MDEs) abrangem os Modelos Digitais (ou numéricos) do Terreno (MDT ou MNT) e os Modelos Digitais de Superfície (MDS), que por sua vez são distintos. É necessário, portanto, esclarecer a priori o significado de cada um desses termos, pois cada um possui peculiaridades a serem consideradas. O MDS é uma matriz que representa o primeiro retorno do sinal refletido para o sensor após incidir na superfície. Assim, nos MDS constam edificações, vegetação e outras feições que cobrem a superfície terrestre. O MDT por sua vez representa a superfície do solo e por isto, teoricamente, não apresenta a interferência de feições construídas sobre o terreno (Behrendt, 2012). No entanto, ainda que a intenção do levantamento seja clara, há insegurança sobre qual informação de fato possuímos, pois sempre haverá uma incerteza de qual feição da superfície interagiu com o sensor (Fisher & Tate, 2006). Evidentemente, haverá disparidade entre a altitude estimada nos diferentes modelos e a não consideração deste fato pode levar o

usuário a conclusões equivocadas sobre a base de dados utilizada. No presente trabalho, utilizaremos com frequência o termo MDE de forma indistinta para facilitar o entendimento, embora tendo conhecimento que os modelos utilizados são de naturezas diferentes. Aqueles produzidos a partir dos dados do IBGE e do sistema LIDAR são MDTs, uma vez que intentam reproduzir a altitude da superfície do solo, enquanto os modelos ASTER e SRTM são, na verdade, modelos digitais de superfície (MDS). O modelo Topodata, por ser derivado dos dados SRTM também é um MDS.

A produção integrada de informações topográficas em larga escala e de forma rápida é uma grande vantagem do uso destas bases de dados e proporcionou um significativo avanço no meio técnico e científico desde seu advento. É também evidente a importância do avanço da computação neste período, onde a produção de softwares e hardwares cada vez mais potentes proporcionou a abertura de novos horizontes para as geociências. Todavia, ainda há muitas questões a serem investigadas quanto à incerteza presente nos MDEs.

As representações digitais do relevo são aproximações da realidade e estão sujeitas a erros e incertezas. Fisher & Tate (2006) argumentam que com os procedimentos executados na elaboração de um MDE, a presença destes erros é tão previsível que, em termos práticos, não há possibilidade de todas as observações em um MDE estarem corretas. Para a altitude de cada ponto amostrado na superfície, haverá maior ou menor diferença em relação ao valor verdadeiro observado em campo. Estes erros podem ser gerados na amostragem, medição e nos processos de interpolação e afetam consideravelmente os produtos gerados (Darnell et al, 2008). É sabido que a propagação dos erros a partir do MDE é potencializada na produção de derivativos de menor ou maior ordem, como declividade, índice de umidade e fluxo acumulado (Wood & Fisher, 1993; Holmes et al, 2000; Florinsky, 2002). Assim, modelos digitais de elevação contêm erros endêmicos, que se propagam pelos produtos derivados deles, a exemplo de parâmetros hidrogeomórficos, como áreas de bacias e características da rede de drenagem (Walker & Willgoose, 1999) e áreas de dispersão de escoamento superficial (Endreny & Wood, 2001).

Neste sentido, o conhecimento da precisão de um modelo digital de elevação é de importância capital na determinação da incerteza dos mapas gerados a partir dele. Todavia, grande parte dos usuários de MDEs não está atenta a essa questão. Wechsler (2003) entrevistou 216 usuários de MDEs em 26 países e observou que apenas metade dos entrevistados considerava que seu trabalho era influenciado pela incerteza, em maior ou menor grau, enquanto 25% dos

entrevistados ignoram qualquer influência da incerteza nos seus produtos. Mesmo os usuários que reconheceram a importância da incerteza não estão dispostos a gastar muito tempo para avaliá-la.

A estimativa do erro em um MDE é usualmente obtida comparando uma base de dados de menor precisão, com outra de maior precisão. Desta forma, trata-se na verdade de uma aproximação relativa, uma vez que consideramos o levantamento de maior precisão como isento de erros. Por esta razão, a comparação entre validações realizadas em diferentes trabalhos deve ser feita com cautela, sobretudo quando a precisão estimada da base de referência não é citada.

Os erros presentes em um MDE são divididos em três tipos: erros brutos (resultantes de falhas no sistema ou equipamento de mensuração), sistemáticos (devido ao viés determinístico no levantamento de dados ou processamento) e aleatórios. Fisher & Tate (2006) abordam com mais ênfase as origens dos erros nos MDEs.

Em geral, o erro estimado em um MDE é expresso na forma de erro médio quadrático (RMSE). Esta medida é tida como um padrão para estimar a precisão de mapas e apresenta vantagens por ser facilmente calculada e internacionalmente padronizada. A precisão está relacionada com a dispersão das observações em torno do valor médio, enquanto a exatidão (acurácia) está relacionada com a proximidade ao valor real, isto é, sem a influência de erros sistemáticos.

Outras estatísticas, como o erro médio (EM) e o desvio padrão do erro (S) também podem ser utilizadas para estimar o comportamento global do erro em um MDE. O erro médio pode apresentar valores positivos ou negativos e por esta razão é mais adequado para indicar a presença de tendências de erros de estimativa. Todavia, estas estatísticas assumem a distribuição homogênea (ou aleatória) do erro no espaço geográfico, o que constantemente não é verificado em situações reais (Gao, 1997; Fisher, 1998; Holmes et al, 2000). Nesse sentido, o uso das geoestatísticas permite um melhor entendimento do comportamento dos erros no espaço geográfico, bem como sua correlação com feições da paisagem (Carlisle, 2005). Estudos mais recentes têm utilizado a autocorrelação espacial para avaliar a distribuição do erro dentro do modelo e correlação para verificar a dependência do erro em relação a características ou feições do relevo, a exemplo da declividade (Darnell et al, 2008), visto que a probabilidade de maiores acertos do modelo está relacionada com características do relevo estudado (Mukherjee et al., 2013).

Diversos trabalhos relatam que há correlação positiva entre o desvio padrão do erro e a resolução do MDE (Li, 1994; Gao, 1997; Fischer, 1998). Espera-se que quanto maior o tamanho da célula de um MDE, menor seja sua precisão por sua

menor capacidade de representar variações da topografia, resultando em um maior erro (Gao, 1997; Mukherjee et al., 2013). Como consequência, esperam-se maiores erros na estimativa da altitude, bem como em seus derivativos, em MDEs de resolução mais baixa em função dessa suavização. O impacto da resolução dos MDEs na representação da declividade foi avaliado por Zhang & Montgomery (1994), onde a declividade média diminuiu de 0,65 m/m em um MDE com 2m de resolução para 0,41m/m em um MDE com 90m de resolução.

Para uma mesma cena, resoluções mais baixas tendem a aumentar a frequência das classes de declividade mais centrais e reduzir aquelas mais extremas (Gao, 1997). Ao interpolar um MDE para resoluções menos detalhadas, em razão da suavização do terreno há redução do gradiente de elevação, refletindo em menor frequência das classes de declividade mais extremas. Este efeito é percebido mais claramente nas classes de maior declividade aonde algumas chegam a desaparecer, enquanto a frequência de gradientes menores é compensada pela redução no gradiente de classes maiores da resolução mais detalhada.

As variâncias da altitude ou da declividade denotam maior complexidade do terreno, bem como a densidade de curvas de nível (Gao, 1997). Carlisle (2005) considerou a textura como sendo a diferença entre o máximo e o mínimo gradiente (declividade) dentro de uma vizinhança. Para avaliar o efeito da morfologia na precisão dos MDEs ASTER GDEM e SRTM, Mukherjee et al (2013) dividiram a área de estudo em cinco classes de acordo com a altitude e encontraram menor precisão em áreas mais elevadas e com maior rugosidade. Verificaram que a precisão decai fortemente em locais onde a declividade excede os 10°, resultados que também foram verificados por Gorokhovich & Voustianiouk (2006). Darnell et al (2008) encontraram correlação positiva entre o erro e a declividade para inclinações acima de 30°. Para valores menores de declividade não foi observada correlação. Os mesmos autores mostram uma concentração de maiores valores de erro nas regiões próximas ao topo da elevação na região por eles analisada.

Considerando que a precisão de um MDE é dependente da complexidade do terreno, Gao (1997) avaliou três tipos de feições geomorfológicas, em ordem crescente de complexidade: vales, topos e encostas. Estas três regiões se distinguem pela variação da altitude ao longo de um perfil topográfico, dada pelo desvio padrão da elevação e densidade de cotas topográficas por área. O referido autor constatou que há um padrão de maiores erros em regiões mais complexas e que, além disso, na medida em que se diminuía a resolução, a taxa de incremento no RMSE (dada pela inclinação da reta) era tanto maior quanto mais complexo o

terreno. Consequentemente, relevos mais movimentados requerem resoluções mais apuradas, pois são mais sensíveis à redução na resolução.

Comparando a diferença numérica entre as superfícies representadas pelos MDEs e a base de referência, Mukherjee et al. (2013) encontraram tendência positiva no erro (superestimação) na face oeste das montanhas para ASTER GDEM. Tendências negativas (subestimação) foram encontradas nos cumes das montanhas e áreas planas. A amplitude do erro vertical para esta base de dados foi de -138m a 199m com maiores erros em locais de relevo mais movimentado e o RMSE encontrado foi de 12,62m. Para SRTM, os referidos autores encontraram uma amplitude de -142m a 206m na diferença entre as superfícies e RMSE de 17,76m. Foram encontradas tendências positivas de erro em áreas montanhosas cobertas por vegetação e tendências negativas em campos abertos e outros tipos de cobertura do solo.

Anomalias na variabilidade local dos dados causam um impacto em qualquer método de estimação. Em uma área com valores uniformes (homocedasticidade), a precisão dos estimadores provavelmente será melhor, enquanto locais com alta variabilidade local (heterocedasticidade) a precisão das estimativas será pior. Existem duas condições mais adequadas para a estimação. A primeira é aquela onde a média local e a variabilidade são constantes ao longo do espaço, ainda que a variabilidade apresente flutuações, se mantém dentro de uma faixa constante. A segunda situação consiste numa flutuação da média com a variabilidade seguindo uma oscilação dentro de um intervalo bem definido (Isaaks & Srivastava, 1989). A correlação entre a média local e a variabilidade indica maiores chances de estimativas mais precisas.

A avaliação dos erros nos MDEs não se restringe somente às análises estatísticas. Diagnósticos visuais através de mapas, perfis ou gráficos também são de grande importância, ainda que suas conclusões sejam mais subjetivas (Wood & Fisher, 1993). Modelos digitais de elevação interpolados a partir de curvas de nível apresentam erros sistemáticos, causados pela exaustiva representação das elevações que coincidem com as cotas e são facilmente detectadas através da análise do histograma do MDE, onde é notado um padrão cíclico de picos que se repete no mesmo intervalo das isolinhas. A visualização do terreno sombreado ou da declividade, por exemplo, podem ser úteis na identificação de erros sistemáticos (Fisher & Tate, 2006).

Uma vez que os erros são detectados, identificados e mensurados, surge uma nova necessidade. É preciso determinar métodos para a correção dos mesmos e, além disso, decidir qual a precisão adequada para a aplicação do MDE. A

metodologia a ser utilizada dependerá do tipo de erro que se está lidando. No caso de erros sistemáticos alguns métodos têm sido relatados: filtro de passa-baixa, desvio padrão local, análise de componentes principais, presença de depressões espúrias, entre outros. Lòpez (2002), citado por Fisher & Tate (2006), sugere que a correção dos valores seja efetuada por interpolação linear entre os pontos adjacentes aqueles a serem corrigidos.

Embora muita pesquisa tenha sido efetuada no intuito de avaliar a precisão altimétrica dos MDEs, bem como explicar e manejar seus erros (Florinsky, 2002), ainda há muito a ser feito no sentido de descobrir a adequação destes modelos em aplicações específicas. As pesquisas voltadas para investigação da incerteza nos MDEs se agrupam em cinco áreas: a) erro do MDE; b) parâmetros topográficos derivados dos MDEs e algoritmos utilizados para sua criação; c) influência da escala do MDE imposta pelo tamanho da célula; d) interpolação de MDEs; e e) modificações na superfície do terreno para geração de superfícies hidrologicamente condicionadas (Wechsler, 2007). Considerando uma medida padronizada, a exemplo o RMSE, para cada tipo de estudo deveria haver um limite superior que definiria o MDE como aceitável para aquela finalidade. Como este limite tem de ser diferente para distintas escalas de trabalho em diversas áreas do conhecimento, torna-se um desafio extenuante. Em decorrência desta lacuna, uma situação comum enfrentada tanto por organizações quanto pelos usuários de MDEs é a falta de padrões ou referências para determinar se uma base de dados é adequada em sua aplicação.

O advento dos dados do sistema LIDAR abre uma nova possibilidade na validação de MDEs. A grande vantagem do mesmo é que associa a precisão centimétrica do sensor a laser a alta densidade de pontos, independentemente da localização ou acessibilidade do ponto na paisagem. Em condições de campo, os pontos obtidos em diferentes sistemas GPS, são coletados em virtude de sua possibilidade (ou mesmo facilidade) de obtenção. Por questões de tempo, acessibilidade e operacionais do GPS, os pontos amostrados provêm uma representação limitada da variabilidade real do terreno em ambientes montanhosos (Carlisle, 2005). Desta forma, um número impraticável de pontos seria necessário para amostrar toda variação do terreno, podendo levar a uma tendência nas estimativas com possível subestimação dos erros (Mukherjee et al, 2013).. Com isto, obtêm-se rapidamente uma densa malha de pontos com alta precisão altimétrica, que permite validar outras bases de dados de menor resolução e estudar seu comportamento em relação às variações da superfície. Possibilita também avaliar a distribuição do erro no espaço geográfico, em toda a área onde esses

dados são presentes. Assim, tem-se não somente uma medida global de precisão do modelo com alta confiabilidade (medidas através da estatística clássica), como também a localização de erros significativos e a presença de agrupamentos (clusters) de valores altos e baixos de erros de estimativa (Figura 1).

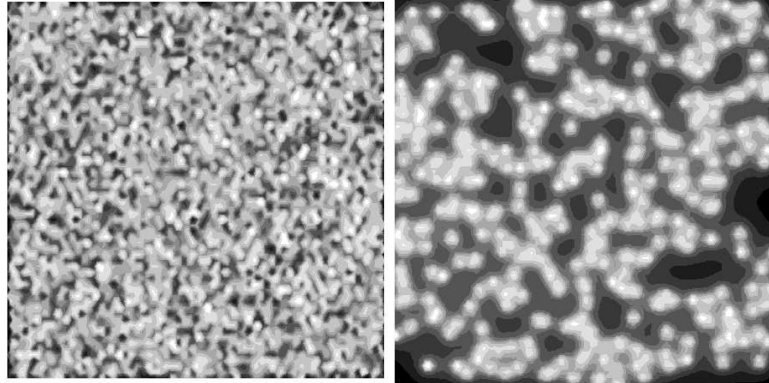


Figura 1 - Exemplo de um padrão de distribuição aleatória (esquerda) e de um padrão de distribuição agrupado (direita). Índice local de Moran (I).

Os modelos digitais de elevação produzidos a partir dos dados LIDAR possuem erros na escala de centímetros, portanto são altamente apropriados para validação de outros modelos cujos erros são da ordem de metros. Hodgson & Bresnahan (2004) realizaram a validação de um MDE criado com dados LIDAR e encontraram RMSE variando de 0,17m em locais de cobertura menos densa a 0,26m sob cobertura florestal. Segundo Aguillar et al. (2010), com base em revisão de literatura, são relatados valores de RMSE entre 0,14m a 1,50m, dependendo das características do terreno. O mesmo autor coloca que a precisão nominal do sistema, de 0,15m é muito difícil de ser alcançada, exceto em situações de terrenos planos e abertos, ou em coletas de dados com altitudes de vôo mais baixas.

Conforme Guo et al. (2010), os fatores que influenciam a qualidade dos MDEs produzidos a partir dos dados LIDAR são: a variabilidade topográfica, a densidade amostral, o método de interpolação escolhido e a resolução espacial. Uma vez que o sistema LIDAR provê uma base de dados com alta densidade e precisão, uma generalização apropriada pode reduzir significativamente o tempo de processamento, sem, contudo, reduzir sua precisão.

Diante do exposto, o presente artigo teve como objetivo avaliar os modelos digitais de elevação disponíveis gratuitamente no Brasil. Os dados foram validados quanto sua precisão altimétrica e pela propagação dos erros pelos derivativos da altitude, mensurada pelo coeficiente de correlação entre os dados de referência e aqueles produzidos pelos MDEs. A distribuição espacial dos erros de estimativa também foi avaliada.

2. Materiais e métodos

2.1 Área de estudo

Como local de estudo foi selecionado um quadrante de 10 x 10 km que abrange parte dos municípios de Santa Bárbara e Barão de Cocais, localizados na porção nordeste Quadrilátero Ferrífero, no Estado de Minas Gerais (Figura 2). A maior parte da área de estudo está contida nos limites do Parque Nacional da Serra do Gandarela, recentemente instituído pelo Decreto 13 de outubro de 2014 (Brasil, 2014).

De acordo com o objetivo deste trabalho, fez-se necessário a escolha de um local com relevos movimentados para validação dos modelos digitais de elevação, visto que são áreas críticas para a modelagem digital do terreno. Além disso, justifica-se a escolha pela disponibilidade dos dados de levantamento por perfilamento a laser (LIDAR) que contempla a região, definitivamente necessários para a validação da metodologia, cedidos pela companhia Vale S/A.

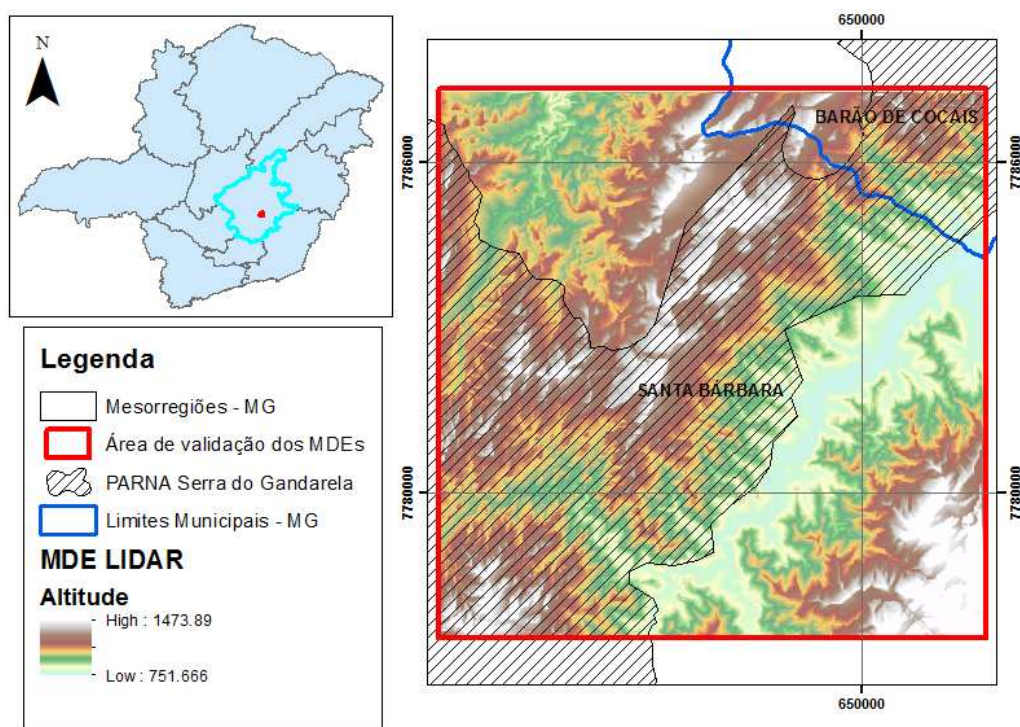


Figura 2 – Localização da área de estudo.

2.2 Bases de dados e softwares utilizados

Foram utilizados dados topográficos gratuitos e com grande cobertura do território brasileiro, tendo como objetivo avaliar a viabilidade técnica de sua aplicação no mapeamento automático de APPs em topos de morros em relevos ondulados. Dentre elas, três são modelos digitais de superfície produzidos por

diferentes fontes (SRTM, ASTER GDEM e TOPODATA) e uma é proveniente de levantamento estereofotogramétrico topográfico regular (IBGE), que por sua vez foi utilizada na forma de um modelo digital de elevação.

Os dados do sistema LIDAR (Light Detection and Rangin) foram utilizados como base de referência neste trabalho. O levantamento com sensor aerotransportado foi feito para a companhia Vale S/A para fins de prospecção de minério e cobre parte da área de estudo. O equipamento utilizado foi o ALS50, com abertura de 70° e frequência de até 150 kHz. Para atingir a quantidade mínima de 4 pontos/m² o perfilamento a laser foi realizado com altitudes de vôo entre 3040 a 2340 metros. Os dados foram classificados pela própria companhia para a formulação de um MDT, assim foram utilizados somente os pontos que continham a altitude do solo. Considerando as características da vegetação local (campos rupestres), as condições são bastante adequadas uma vez que se espera pouca interferência do dossel na obtenção dos dados do terreno. Os pontos foram transformados em um MDE com resolução de 2x2 m através da média da altitude dos pontos incluídos na área da célula (pixel). A redução no volume de dados foi necessária para reduzir o tempo de processamento.

O modelo digital de elevação do SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) foi produzido através de uma parceria entre a Agência Nacional de Inteligência Geoespacial (NGA) e a Agência Espacial Norte-Americana (NASA), com o objetivo de coletar dados de elevação de todo o globo, entre as latitudes 60° N e 57°S. Numa missão com 11 dias de duração, entre 11 e 22 de fevereiro de 2000 a bordo do ônibus espacial Endeavour, coletou os dados através de interferometria por radar (InSAR), fornecendo informações sobre a elevação da superfície em resolução de 1 segundo de arco (aproximadamente 30x30 m) para o território norte-americano e 3 segundos de arco (~90x90 m) para o restante do mundo. Somente no início do ano de 2015, durante a finalização do presente trabalho, foram liberados os MDEs com 30m de resolução para além dos EUA, razão pela qual não foram aqui testados. Os dados são disponibilizados na internet pelo serviço geológico norte-americano (USGS) no site <http://srtm.usgs.gov/index.php>. Para a resolução até então disponível no território brasileiro (~90x90 m) a literatura cita diferentes escalas de trabalho, baseadas no Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC), desde 1:30.000 até 1:250.000 (Higa et al, 2006; Souza & Loch, 2006 apud Martins, 2010) para Classe A. Essa variação está relacionada com particularidades dos terrenos avaliados, bem como a metodologia de validação utilizada.

A base de dados do sensor ASTER GDEM (Advanced Space borne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model) foi

produzida conjuntamente pelo governo japonês e a NASA. Esse sensor foi lançado a bordo do satélite Terra em dezembro de 1999. Esta missão cobriu toda superfície terrestre entre as latitudes 83°N e 83°S, produzindo um MDE com resolução de 30m (aprox. 1 arc.seg-1) através de fotogrametria estereoscópica digital. A segunda versão deste MDE foi lançada em outubro de 2011, onde uma série de inconsistências e erros sistemáticos presentes na primeira versão foi corrigida. Nos dias atuais sua precisão vem sendo avaliada pela comunidade acadêmica. Houve um significativo ganho na qualidade deste produto desde a primeira versão, onde a precisão vertical era de 20m, para a segunda versão onde a precisão vertical é de 8,86m, a 95% de confiabilidade, de acordo com o ASTER GDEM V2 Validation Report (disponível em: <http://www.jspacesystems.or.jp>). Em uma região montanhosa do Estado do Rio de Janeiro, Yoshikawa et al (2011) encontraram um valor de 9,88m para o RMSE, tendo como referência curvas de nível na escala de 1:10.000.

O MDE Topodata foi produzido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e lançado em agosto de 2008 a partir de uma série de tratamentos do SRTM, que envolveram preenchimentos de falhas, refinamento, derivação e pós-processamento (Valeriano & Rossetti, 2012). Como produto foi gerado um MDE com resolução de 30 metros, a partir da interpolação dos dados originais. Os dados estão disponíveis para download em www.dsr.inpe.br/topodata/acesso.php.

As curvas de nível foram produzidas pela Diretoria de Geodésia e Cartografia do Instituto Nacional de Geografia e Estatística (IBGE) nos anos 1970 a partir de um levantamento estereofotogramétrico topográfico regular. Para a região de estudo, as cartas estão na escala de 1:50.000 com equidistância vertical de 20m. Foram utilizadas as folhas Acuruí (SF-23-X-A-III-2), Rio Acima (SF-23-X-A-III-3), Belo Horizonte (SE-23-Z-C-VI-3) e Caeté (SE-23-Z-C-VI-3). A união das quatro cartas foi feita através de edição manual no ArcMAP 10.1, utilizando imagens de satélite disponíveis nos mapas-base do SIG para referência do relevo. A partir das curvas de nível e dos pontos cotados foi produzido um MDE com 10m de resolução espacial através do interpolador Topo To Raster não condicionado hidrologicamente. A resolução escolhida para renderização dos dados IBGE baseou-se na relação: Escala = Resolução / 0,0002.

Para manipulação dos dados espaciais foi utilizado o sistema ArcGIS 10.2 (ESRI). Os resultados foram exportados para planilhas do Excel e as análises estatísticas foram executadas no software R. Antes de iniciar as análises, os dados foram georreferenciados de forma automática com a extensão Georeferencing,

utilizando os dados LIDAR como referência. Assim, todas as grades foram alinhadas com essa última.

2.3 Validação dos MDEs.

A validação dos MDEs foi feita através de diferentes critérios, avaliando tanto a altitude presente nos modelos quanto seus derivativos (declividade, face de exposição e curvatura). Foram feitos diferentes testes com o intuito de responder algumas questões que cingem a prática de validação, nomeadamente o tamanho amostral utilizado na mesma.

Um teste à parte foi efetuado para a base de dados do IBGE: as curvas de nível foram convertidas em pontos, com equidistâncias crescentes, e submetidos a diferentes interpoladores, para avaliar a influência desses dois fatores na precisão dos MDEs produzidos

2.3.1 Estatísticas descritivas

As estatísticas descritivas dos modelos digitais de elevação utilizados foram tabuladas. Foram produzidos histogramas com a distribuição do erro de estimativa para cada modelo para verificar a normalidade, assimetria e curtose da distribuição. A normalidade da distribuição dos erros de estimativa foi verificada pelo teste de Shapiro-Wilk.

Em uma avaliação mais descritiva, foram traçados perfis topográficos comparando o relevo representado pelos MDEs testados com a base de referência (LIDAR). Esta descrição é importante nesta pesquisa, onde a representação da morfologia das elevações tem bastante relevância, embora os resultados sejam mais subjetivos representam boa fonte de discussão. Também foram gerados gráficos qq-plots, scatterplots e boxplots para análise exploratória dos dados. Uma forma simples de observar o efeito suavizante de um interpolador é através da análise do gráfico qq-plot com os valores observados versus estimados, onde é característica a maior frequência de valores baixos nas estimativas do que nos valores verdadeiros, e menores frequências de valores altos nas estimativas em relação aos valores verdadeiros.

Espera-se também que os erros de estimação apresentem pouca variabilidade. Nem sempre será possível que um método apresente baixa variabilidade e média igual a zero para os erros. Por conta disso, algumas vezes é necessário fazer opção entre aceitar um grau de viés com o objetivo de obter estimativas com menor variabilidade (Isaaks & Srivastava, 1989).

Os dados obtidos no ArcMap foram exportados para planilhas do Excel e as análises estatísticas (descritiva e inferencial) foram realizadas no software R.

2.3.2 Medidas de precisão dos modelos

O valor obtido para as estimativas de precisão dos modelos, RMSE e EM, foram avaliados quanto ao número de pontos utilizados na validação. Objetivou-se, dessa forma, buscar um número de pontos de checagem que fornecesse estimativas confiáveis da precisão dos modelos. As fórmulas utilizadas para o cálculo do erro médio quadrático (RMSE) e do erro médio (EM) são apresentadas:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum(\text{Zest} - \text{Zobs})^2}{n}}$$

$$\text{EM} = \frac{\sum(\text{Zest} - \text{Zobs})}{n}$$

Onde “Zest” é o valor de altitude estimado no Modelo Digital de Elevação a ser avaliado, “Zobs” é a altitude observada na base de referência, e “n” é o número de pontos de checagem utilizados.

Utilizou-se, como referência, a curva descrita pelo erro padrão da média em função do número de pontos lançados na área de validação. O erro padrão da média (“ \hat{S}_x ”), foi calculado através da expressão:

$$\hat{S}_x = \frac{S}{\sqrt{n}}$$

Onde “S” é o desvio padrão da média obtida com todas as observações e “n” é o número de amostras.

O tamanho amostral considerado como adequado foi testado comparando os parâmetros obtidos nessa abordagem com a validação total (ou censo) dos MDEs, onde RMSE e EM foram calculados para todas as células dos MDEs por diferença numérica da referência.

Para verificar a variação das estimativas de precisão em relação ao número de pontos utilizados, duas abordagens distintas foram realizadas. Em primeiro lugar, executou-se 21 iterações variando-se crescentemente o número de pontos de controle utilizados na validação, lançados aleatoriamente, até o momento em que os valores obtidos para os parâmetros estatísticos (RMSE e EM) se estabilizassem.

O número de pontos variou entre 10 e 500 valores que aqui correspondem respectivamente a densidades amostrais de 0,11 a 5,54 pontos/km². Posteriormente, realizou-se 30 repetições com 20, 100 e 500 pontos, representando respectivamente, baixa, média e alta densidade amostral.

Cada malha de pontos foi alocada individualmente em um arquivo shapefile e os conjuntos destes arquivados em Geodatabases distintas. Para cada um destes conjuntos, a partir dos valores extraídos dos MDEs a serem validados e os obtidos na referência (LIDAR), foram então calculadas as estatísticas RMSE e EM, através de rotinas de programação que executaram o cálculo de forma automatizada, gerando ao final uma única tabela contendo os resultados.

Por fim, foi realizada uma validação total calculando o RMSE e o EM para todas as células dos MDEs avaliados. Para tal, os mesmos foram transformados em pontos, onde cada ponto representava uma célula do MDE original. Em seguida calcularam-se as referidas estatísticas pela diferença entre o estimado (valor presente no MDE avaliado) e o observado (dados do sistema Lidar). No caso do IBGE, os pontos foram obtidos a partir do MDE com 10m de resolução produzido pelo interpolador Topo to Raster.

2.3.3 Padrão de Exatidão Cartográfica

A qualidade dos modelos digitais de elevação foi classificada segundo o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) altimétrico, instituído pelo Decreto Lei nº 89.817 de 20 de junho de 1984, que estabelece instruções reguladoras das normas técnicas da cartografia brasileira. O mesmo coloca que “90% dos pontos isolados de altitude, obtidos por interpolação de curvas de nível, quando testados no terreno, não deverão apresentar erro superior ao Padrão de Exatidão Cartográfica. A probabilidade de 90% corresponde a 1,6449 vezes o Erro Padrão - PEC. O Erro- Padrão isolado num trabalho cartográfico, não ultrapassará 60,8% do Padrão de Exatidão Cartográfica.

O cálculo do PEC foi feito através do software GeoPEC (Santos, 2010), usando 500 pontos de checagem.

2.3.4 Modelagem da distribuição espacial dos erros de estimativa por geoestatística

Os métodos estatísticos clássicos geralmente supõem que as variáveis aleatórias são espacialmente independentes entre si, ou seja, que observações vizinhas não exercem influências umas sobre as outras e se utilizam de parâmetros como média e desvio padrão para representar um fenômeno. Entretanto, conforme

sistematicamente divulgado na literatura, o padrão de distribuição espacial dos erros de estimativa não pode ser explicado pela estatística clássica. Por essa razão, buscou-se examinar o padrão de distribuição espacial dos erros de estimativa por geoestatística.

A autocorrelação espacial dos dados foi verificada através do índice I global de Moran, que compara a distribuição dos mesmos com uma distribuição aleatória, considerando tanto a posição das observações quanto seus valores em relação à média, e classifica a distribuição em dispersa, aleatória ou agrupada (Wong & Lee, 2005). Essa análise considera a distribuição como um todo, por isso é chamada global. O índice I é calculado através da equação:

$$I = \frac{n}{S_0} \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{i,j} z_i z_j}{\sum_{i=1}^n z_i^2}$$

Onde “ z_i ” é o desvio do atributo da feição “ i ” de sua média ($x_i - X$), “ $w_{i,j}$ ” é o peso espacial entre as feições “ i ” e “ j ”, “ n ” é o número total de feições e “ S_0 ” é o valor agregado de todos os pesos espaciais “ $w_{i,j}$ ”, dado por:

$$S_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{i,j}$$

O valor do z-score é calculado da seguinte forma:

$$z_I = \frac{I - E[I]}{\sqrt{V[I]}}$$

Onde:

$$E[I] = \frac{-1}{n - 1}$$

$$V[I] = E[I^2] - E[I]^2$$

A presença de agrupamentos (clusters) foi testada pelo índice I local de Moran (Anselin, 1995), a 95% de confiabilidade. Esse teste identifica o agrupamento de valores altos ou baixos, bem como de outliers espaciais. Caso o valor I calculado seja maior que o esperado, há indicação de um agrupamento. A significância desse teste é dada pelo z-score e p-value. O índice I local de Moran é calculado pela expressão:

$$I_i = \frac{x_i - \bar{X}}{S_i^2} \sum_{j=1, j \neq i}^n w_{i,j} (x_j - \bar{X})$$

Onde " S_i^2 " é dado por:

$$S_i^2 = \sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{(x_j - \bar{X})^2}{n-1} - \bar{X}^2$$

O valor do z-score para a estatística é calculada da seguinte forma:

$$z_{I_i} = \frac{I_i - E[I_i]}{\sqrt{V[I_i]}}$$

Onde:

$$E[I_i] = - \sum_{j=1, j \neq i}^n w_{i,j}$$

$$V[I_i] = E[I_i^2] - E[I_i]^2$$

Os resultados das análises geoestatísticas foram apresentados na forma de mapas de posição, gráficos e tabelas. Os índices foram calculados utilizando-se os valores de todas as células dos MDEs, que foram transformados em pontos com equidistância relativa à resolução dos mesmos.

2.3.5. Precisão dos modelos e declividade do terreno

A precisão dos modelos digitais de elevação foi avaliada também em relação ao relevo, considerando a declividade do terreno como expressão da variabilidade local dos dados. Para efetuar esta análise, foi criado um mapa de declividade da área através da função SLOPE aplicada sobre o MDE proveniente da base de dados LIDAR. Foi aplicado um filtro de médias retangular com janela móvel de dimensão 15x15 metros para atenuar a expressão do microrrelevo no MDE antes de criar o MDD.

O uso de técnicas de filtragem de artefatos do terreno é comum (Albani & Klinkenberg, 2003; Oimoen, 2000) e proporciona criação de produtos mais consistentes, ao eliminar erros sistemáticos que levam a variações abruptas nos dados em nível local. Produzir matrizes com os valores médios de uma célula e sua vizinhança representa uma tendência subjacente dos parâmetros de terreno

(Carlisle, 2005). Há também aplicações onde o objetivo é eliminar as edificações, presentes nos dados de sensores a laser, através de uma série de procedimentos (Vosselman & Vaas, 2001). Kersting et al. (2005), estudando uma área urbana, avaliaram um método de redução de pontos, provenientes da aquisição de dados de superfície pelo sistema LIDAR, baseado em uma rede irregular de triangulação. Verificou-se que este processo gera modelos mais compactos e com pouca perda de informação, provendo melhorias em termos de processamento e armazenamento dos dados.

No presente trabalho, contudo, utilizou-se uma técnica mais simples, pois o intuito é tão somente obter um relevo mais suavizado em micro escala, sem afetar o comportamento geral do modelo. Assim, o que se fez foi eliminar pequenas variações locais, preservando as feições como um todo. O tamanho escolhido para o filtro (15 x 15m) está dentro da faixa utilizada na literatura e foi determinado de forma empírica através de perfis topográficos traçados sobre MDEs submetidos a filtros de diferentes tamanhos (Figura 3) e também pela condição de que o MDE gerado pela filtragem deveria possuir a mesma amplitude de dados do MDE original. Vale ressaltar que o poder suavizante de um filtro está relacionado com o volume de dados por área. No caso dos dados LIDAR, a grande densidade de informações permite que se faça uma filtragem sem perda substancial de informações.

O modelo digital de declividade foi então reclassificado de acordo com as classes definidas por EMBRAPA (1979). Em cada repetição com 500 pontos cada, foi extraído deste arquivo matricial o valor relativo às classes: 1- plano (0 a 3°), 2- suave ondulado (3 a 8°), 3 - ondulado (8 a 20°), 4 - forte ondulado (20 a 45°) e 5 - montanhoso (45 a 75°). O desvio médio ($Z_{est} - Z_{obs}$) foi calculado separadamente por cada classe de declividade e os valores foram submetidos a testes de média para verificar se havia diferença significativa entre os desvios por classes de relevo e entre bases de dados por classe de relevo.

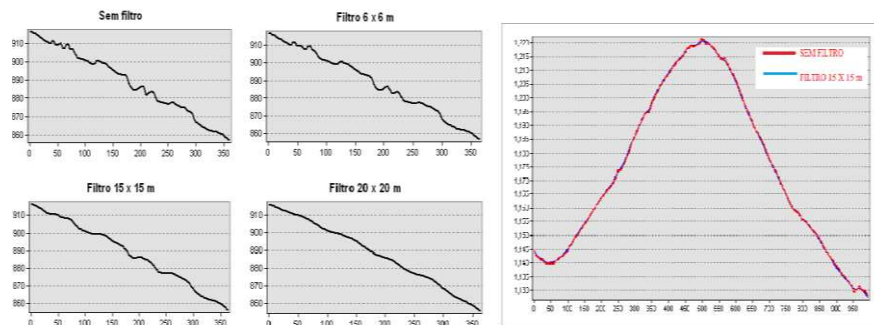


Figura 3 - Perfis topográficos traçados sobre MDEs produzidos a partir dos dados LIDAR por filtragem, com diferentes tamanhos de filtro. À direita, perfil de uma elevação no MDE LIDAR original e naquele produzido por filtragem com janela móvel de 15 x 15 m.

Outras análises também foram feitas para os modelos digitais de declividade (MDD) produzidos a partir dos MDEs. Foi avaliada a influência do tamanho de célula dos modelos na propagação dos erros nesse derivativo, dada pelos coeficientes de correlação de Pearson.

3. Resultados e discussão

3.1 Estatísticas descritivas

Os modelos digitais de elevação apresentaram, em termos globais, valores aproximados para amplitude, média e desvio padrão da altitude. As estatísticas descritivas extraídas diretamente dos arquivos matriciais completos são apresentadas na Tabela 1. A altitude no local varia entre 752m e 1456m e a altitude média é de 1026,53 metros.

Tabela 1 – Estatísticas descritivas dos MDEs utilizados na área de validação.

Dados	N	Área (ha)	Mín	Max	Amplitude	Mediana	Média	Desv. Pad.
LIDAR	22562500	90,25	752	1456	704	1020	1026,53	145,10
Topodata	99856	90,04	755	1448	693	1025	1031,27	144,39
ASTER	99225	90,02	755	1463	708	1032	1037,30	144,45
IBGE	902500	90,25	743	1454	711	1017	1025,29	146,41
SRTM	11025	90,72	754	1446	692	1026	1032,32	143,34

A distribuição dos erros de estimativas em 500 pontos de checagem é apresentada pelos histogramas (Figura 4), onde se destaca a frequência dos erros para SRTM, que tem distribuição assimétrica positiva e curtose leptocúrtica. Os dados ASTER, em menor grau, apresentam o mesmo comportamento. A normalidade da distribuição dos erros foi verificada pelo teste de Shapiro-Wilk, a 95% de confiabilidade (Tabela 2). Pelo p-valor calculado, rejeita-se a hipótese de normalidade na distribuição dos erros para ASTER e SRTM. Para IBGE e Topodata, não se pode rejeitar a hipótese de normalidade. A melhor distribuição de erros nos dados Topodata em relação a sua origem, que são os dados SRTM, indicam que houve alguma melhoria no processamento desse último.

Tabela 2 - Estatísticas da distribuição de frequências dos erros de estimativa.

Dados	Min	Max	Média	Desv.Pad	Assimetria	Curtose	1°-q	Mediana	3°-q	p-valor ¹
Topodata	-50	68	4,37	20,84	-0,06	2,65	-10	5,5	18	0,1008
ASTER	-22,0	47,0	10,71	10,04	0,36	3,37	4	10	17	0,0011*
IBGE	-30,0	29,0	-1,13	10,52	0,08	2,96	-8,0	-1,5	6,0	0,4191
SRTM	-34,0	74	6,26	13,14	0,64	4,32	-2	5	14	0,000*

¹Teste Shapiro-Wilk

O mais desejável é que os erros de estimativa tenham a distribuição mais próxima possível da normal, erro médio mais próximo de zero e poucos valores extremos (Isaaks & Srivastava, 1989). Sob essa óptica, os dados IBGE apresentaram melhores resultados. Como é um modelo de elevação e não de superfície, a “não interferência” da cobertura do solo é traduzida em menor erro máximo e médio, bem como menor valor para o 3º quartil.

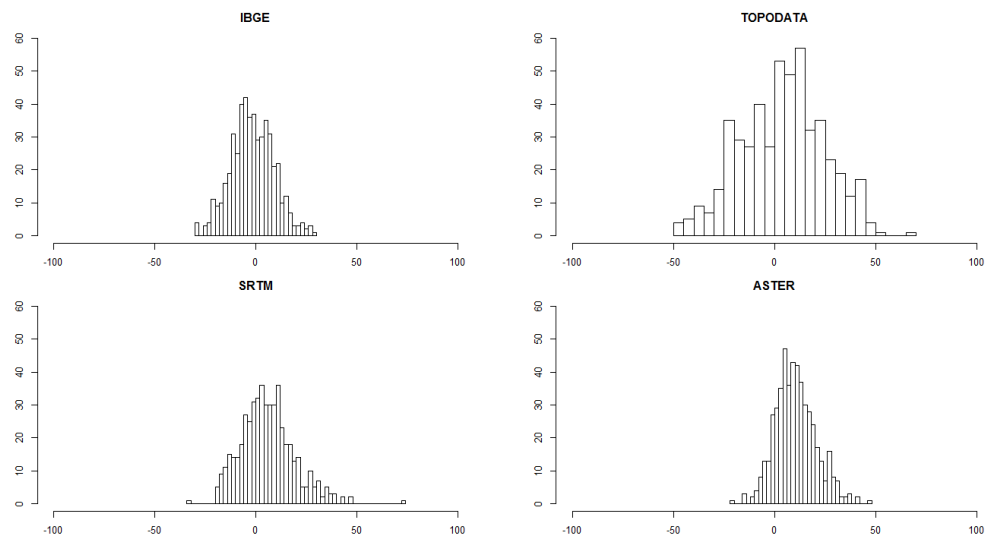


Figura 4 - Histogramas dos erros de estimativa nos modelos digitais de elevação testados.

A discrepância entre a distribuição dos erros de estimativa e uma distribuição normal pode ser visualizada através dos gráficos “Normal QQ-plots” (Figura 5), onde se ratifica o melhor ajustamento dos dados IBGE e um maior distanciamento dos dados SRTM da linha de normalidade.

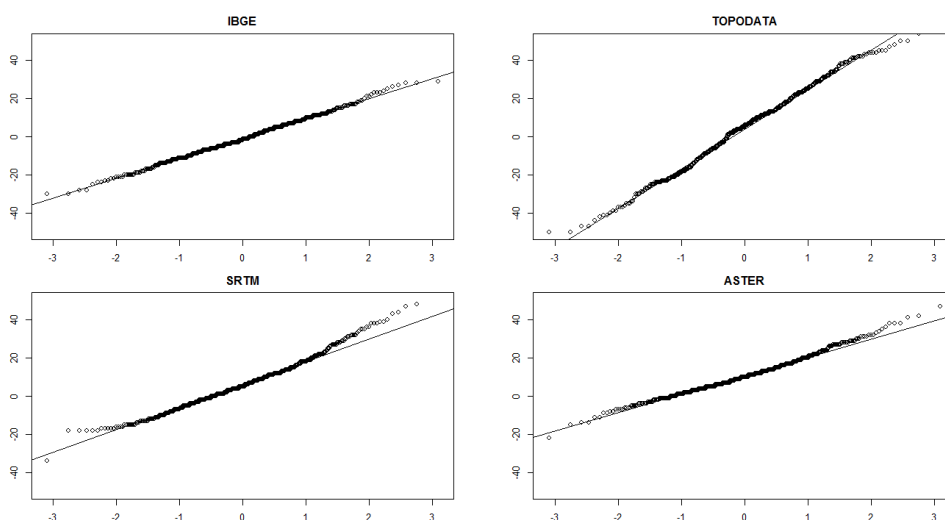


Figura 5 - Normal QQ-plots dos erros de estimativa.

Os perfis topográficos permitem uma avaliação visual dos modelos digitais de elevação de forma mais subjetiva, mas bastante elucidativa. Para examinar a

representação do relevo nos MDEs, foram traçados três perfis em diferentes feições do relevo: uma seqüência de elevações (morros), uma encosta e um fundo de vale (Figuras 6, 7 e 8, respectivamente), comparando os MDEs com os dados de referência (LIDAR).

A representação dos topos de morros pelos modelos é bastante variada. O MDE ASTER representa bem o contorno dos pontos de sela e a altitude dos topos, ainda que com alguma superestimação na altitude dos pontos de sela. Aparentemente há maior equilíbrio entre superestimativas e subestimativas no MDE IBGE. O perfil topográfico dos dados SRTM mostrou superestimativas na altitude de todos os pontos de sela visualizados e subestimativas nos topos, o que se repete no MDE Topodata. Todavia, nesse último, o entalhamento dos pontos de sela é mais bem definido.

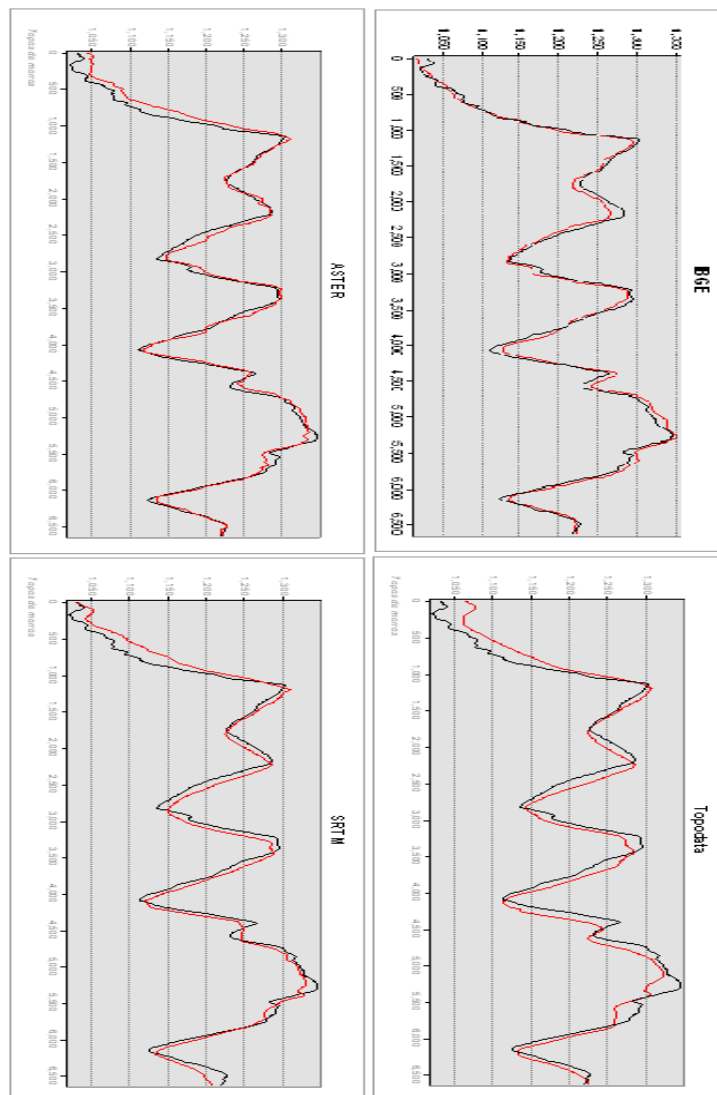


Figura 6 – Perfil topográfico comparando os MDEs avaliados (vermelho) em relação à referência de campo (preto). Perfil traçado em uma seqüência de topos de morros.

Observa-se um padrão de superestimativas da altitude nas encostas, que está associado à inépcia dos MDEs para representar áreas com alta variabilidade de dados. Como consequência, a declividade das encostas é subestimada. Nesse aspecto, o MDE IBGE apresentou melhor desempenho. Percebe-se que os MDEs SRTM e Topodata representam as encostas de forma bastante simplificada, não representando as nuances do relevo (Figura 7).

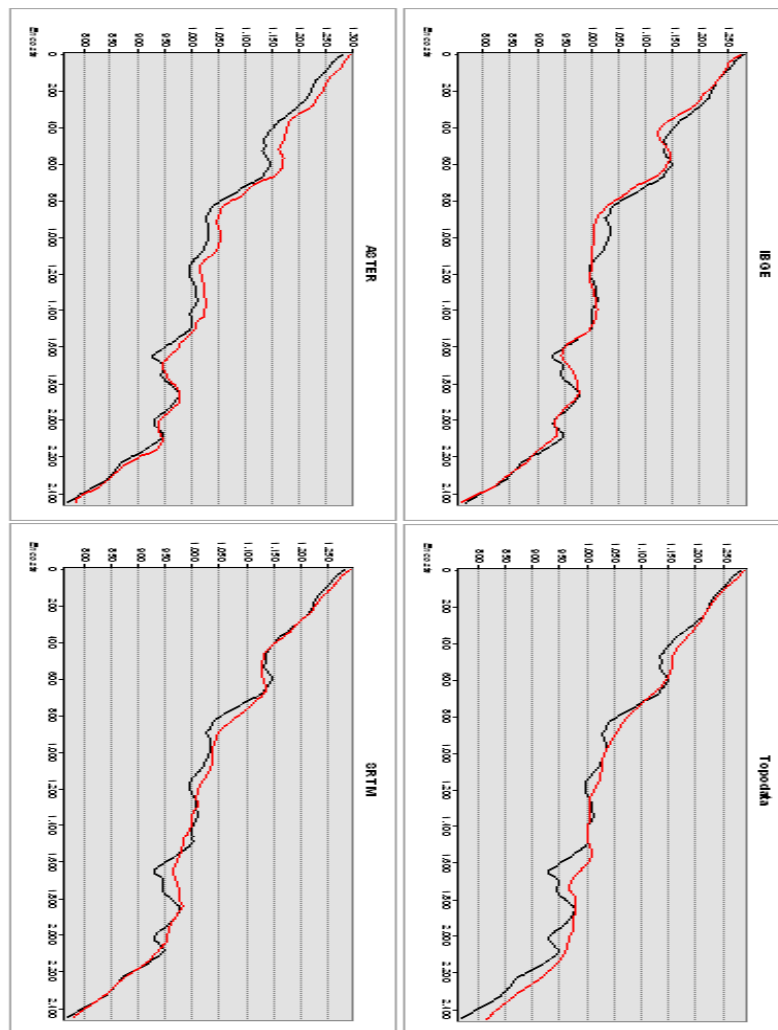


Figura 7 – Perfil topográfico comparando os MDEs avaliados (vermelho) em relação à referência de campo (preto). Perfil traçado em uma encosta.

Nos perfis traçados em um talvegue, os MDEs ASTER, Topodata e SRTM mostram boa coincidência com a profundidade da rede de drenagem, porém são pouco precisos no desenho dos taludes (Figura 8). Por outro lado, o MDE IBGE é bastante fidedigno quanto aos taludes, mas apresentou um aprofundamento exagerado da drenagem, o que provavelmente decorre do interpolador utilizado (Topo to Raster), que provê um “entalhamento” na rede de drenagem, para garantir a consistência hidrológica do MDE.

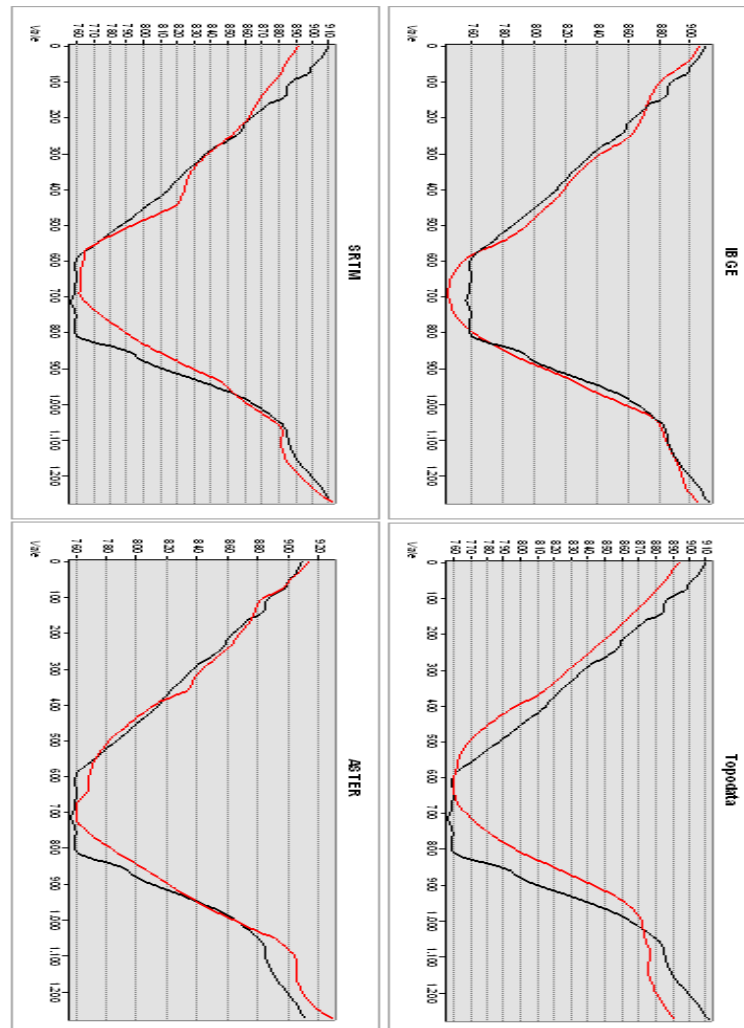


Figura 8 – Perfil topográfico comparando os MDEs avaliados (vermelho) em relação à referência de campo (preto). Perfil traçado em um talvegue.

3.2 Determinação do tamanho amostral e validação dos MDEs

A inexistência de padrões para determinação do tamanho amostral utilizado na validação dos MDEs é uma grande lacuna. Como consequência, muitos trabalhos utilizam um número baixo de pontos de checagem, afetando a confiabilidade dos resultados. O tamanho amostral adequado pode ser obtido dentro de um contexto estatístico, garantindo a qualidade da validação (Höhle & Höhle, 2009). Merchant (1989) sugere que sejam usados, no mínimo, 20 pontos para aferir a qualidade geométrica de um produto cartográfico.

No presente estudo, nos fundamentamos em uma estimativa de precisão do cálculo da média populacional para determinar quantos pontos deveriam ser usados na validação. O arcabouço lógico é: se um número de pontos é estatisticamente adequado para estimar a altitude média de um modelo numa determinada área, ele também deverá ser suficiente para mensurar os erros de estimativa do mesmo.

Desta forma, o erro padrão da média (\hat{S}_x) foi calculado para os diferentes tamanhos amostrais, variando de 10 a 500 pontos. Daí escolheu-se o valor de 500 para análises e validações posteriores, pois analisando a curva dada pelo erro padrão da média em função do tamanho amostral (Figura 9), foi o valor que mais se aproximou do valor real da média populacional e não se mostrou dispendioso em termos de esforço computacional sendo, portanto, considerado suficiente para o propósito desta pesquisa.

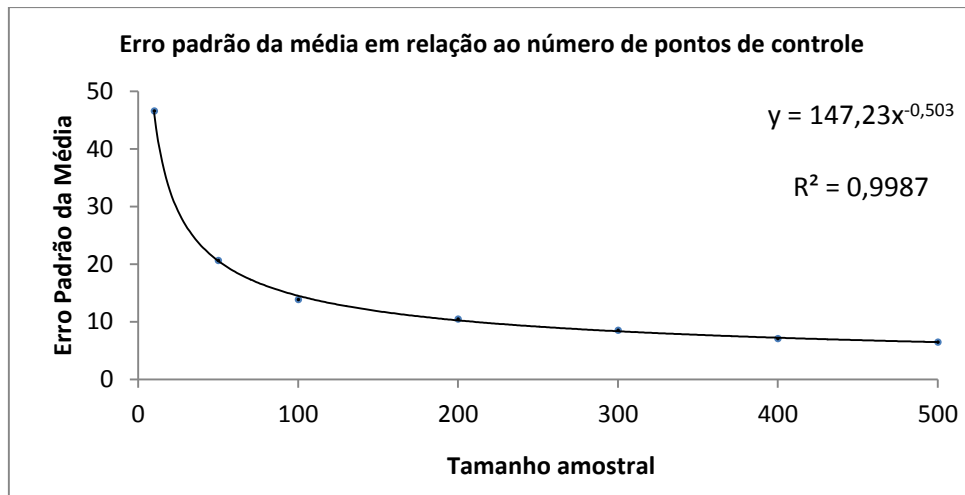


Figura 9 - Erro padrão da média obtido com diferentes tamanhos de amostra.

O tamanho amostral, ou número de pontos de checagem utilizados na validação, também poderia ser estimado pela expressão:

$$n = \left(\frac{Z_{\alpha/2} \cdot \sigma}{E} \right)^2$$

Onde “n” é o tamanho amostral, “ $Z_{\alpha/2}$ ” é o valor crítico que corresponde ao grau de confiança desejado, σ é o desvio-padrão da altitude no MDE, “E” é a margem de erro ou erro máximo de estimativa, que indica a diferença máxima entre a média amostral e a média populacional.

Através dessa fórmula, o tamanho amostral para estimar a média dos MDEs com 90% de confiabilidade e margem de erro de ± 10 m seria de: 571 pontos para LIDAR, 562 para Topodata e ASTER, 580 para IBGE e 530 para SRTM. Observa-se que os valores calculados são bastante próximos daqueles obtidos de forma mais empírica, baseados na curva do erro padrão de estimativa.

Os MDEs originais foram comparados com a referência para obtenção das medidas: raiz quadrática do erro médio (RMSE) e erro médio (EM). Na primeira abordagem, onde o objetivo foi avaliar a variação dessas estatísticas em relação ao tamanho amostral, observou-se que para baixas densidades amostrais há uma

grande variação nos resultados obtidos, indicando que estas podem levar o analista a conclusões equivocadas. Por exemplo, ao lançar 75 pontos na área de validação (equivalente a 0,8 pontos/km²), o valor do RMSE para a base de dados Topodata foi de 14,90, muito próximo do obtido para ASTER: 14,34. Todavia, ao observarmos o gráfico (Figura 10) fica evidente que este resultado não representa a realidade, sendo simples consequência do acaso relativo ao erro amostral. De forma análoga, com apenas 10 pontos de checagem, ASTER, SRTM e IBGE poderiam ser classificados com o mesmo padrão de qualidade, o que é bastante incoerente. A considerável diferença entre essas últimas é exposta na Figura 11, onde a validação feita com 500 pontos de checagem mostra como os MDEs se distinguem quanto à precisão.

Este fato leva à seguinte conclusão: quando uma densidade amostral baixa é utilizada, os resultados obtidos para fins de comparação entre diferentes bases de dados não necessariamente representam a verdade e tampouco se prestam à classificação destes dados quanto aos padrões de cartografia. Contudo, o próprio Decreto-Lei nº 89.8187 (BRASIL, 1984), que instituiu o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) não considera este fato, reforçando a necessidade de sua atualização, como corroboram alguns autores (Santos & Vieira, 1999).

Na verdade, mesmo em países desenvolvidos, há a constante busca por padrões mais adequados de classificação cartográfica, os quais futuramente devem considerar: o padrão de distribuição espacial dos erros, a não normalidade da distribuição espacial dos erros, o tamanhos amostrais adequados e índices padronizados para fins comparativos (Zandbergen, 2008).

Apesar da grande oscilação observada entre os resultados obtidos, os valores de RMSE calculados para a base de dados do IBGE foram sempre menores, independente da densidade amostral utilizada. Outra ocorrência que chama a atenção é o erro médio observado para o produto ASTER, com valores sempre acima de 8,0m. Este resultado indica a possibilidade de tendência nestes dados, que pode ser consequência da cobertura do solo no local ou mesmo erro sistemático do produto. O deslocamento vertical do MDE ASTER GDEM 2 é relatado por Tachikawa et al.(2011), os quais reconhecem a influência da cobertura vegetal nesse modelo.

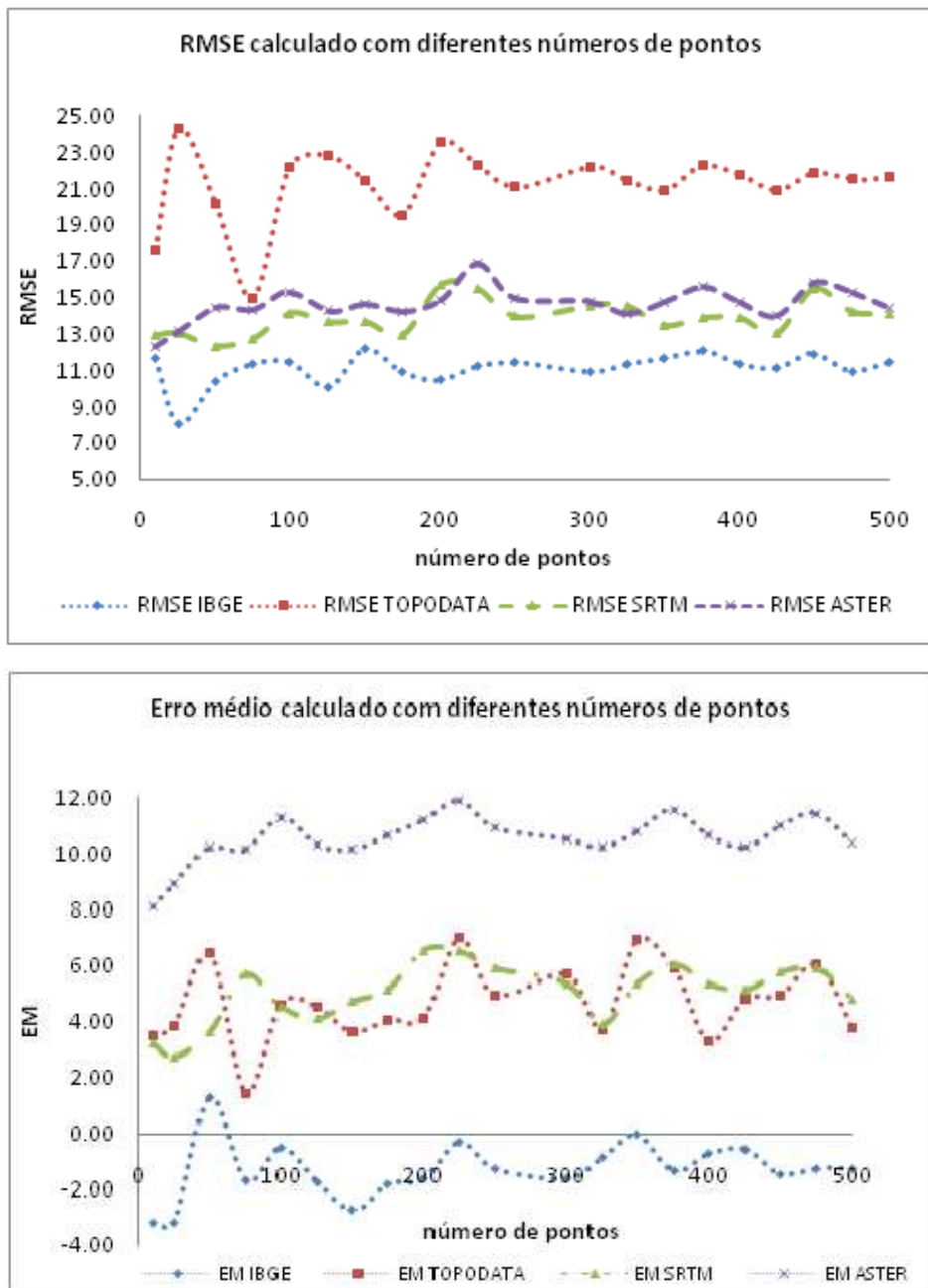


Figura 10 – RMSE e EM calculados utilizando diferentes tamanhos amostrais (número de pontos) na validação, em valores crescentes.

O resultado da validação utilizando 500 pontos de checagem apresentou pouca variabilidade (Figura 11), de onde se conclui que esta densidade amostral foi suficiente para captar toda variabilidade da área analisada.

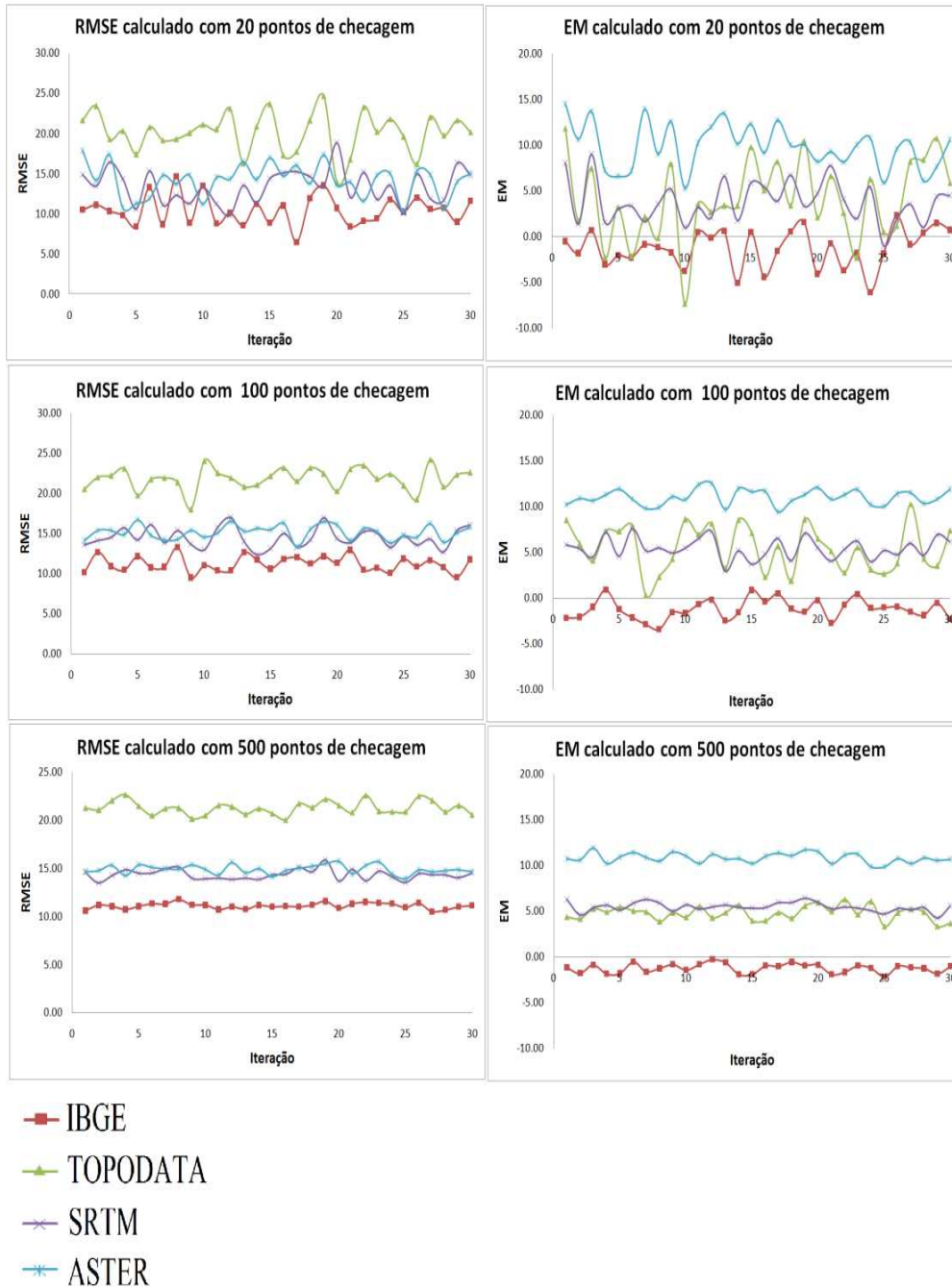


Figura 11 – Erro médio quadrático (RMSE) e erro médio (EM) dos modelos digitais de elevação calculados com três tamanhos amostrais (20, 100 e 500 pontos) e 30 repetições.

Os valores da média e desvio padrão para RMSE e EM foram calculados com os dados das 30 repetições, com 20 e 500 pontos de checagem (Tabela 3), para averiguar se a média obtida em várias repetições com baixa densidade amostral se equivale aos valores estimados com um número maior de pontos. Os valores obtidos, em média, são muito semelhantes para baixas e altas densidades amostrais (20 e 500 pontos, respectivamente), sugerindo o RMSE e o EM calculado em várias repetições com baixa densidade amostral podem ser equivalentes aqueles calculados com uma amostragem maior. Contudo, o menor desvio padrão

observado nas validações com maior densidade amostral indicam a maior confiabilidade dessas estimativas, quando obtidas numa única amostragem.

Tabela 3 – Valores globais da média e desvio padrão obtidos para RMSE e EM calculados com 20 e 500 pontos. Médias de 30 repetições. NPC: Número de pontos de checagem.

NPC	Estatística	RMSE				EM			
		IBGE	TOPODATA	SRTM	ASTER	IBGE	TOPODATA	SRTM	ASTER
20	Média	10,4	20,1	13,4	14,2	-1,3	4,1	3,8	9,9
	Desv. Pad.	1,8	2,5	2,1	2,1	2,1	4,5	2,4	2,5
500	Média	11,1	21,3	14,4	14,9	-1,2	4,8	5,5	10,8
	Desv. Pad.	0,3	0,7	0,5	0,5	0,5	0,8	0,5	0,5

A grande variabilidade na estimativa do RMSE calculado com baixa densidade amostral, é explicitada pelos gráficos bloxpots (Figura 12). Por outro lado, a validação com um número adequado de pontos foi capaz de diferenciar os modelos com melhor qualidade, na medida em que reduziu a variabilidade das médias. Para Zandbergen (2008), um tamanho amostral de 20 pontos também foi insuficiente para representar toda complexidade do relevo.

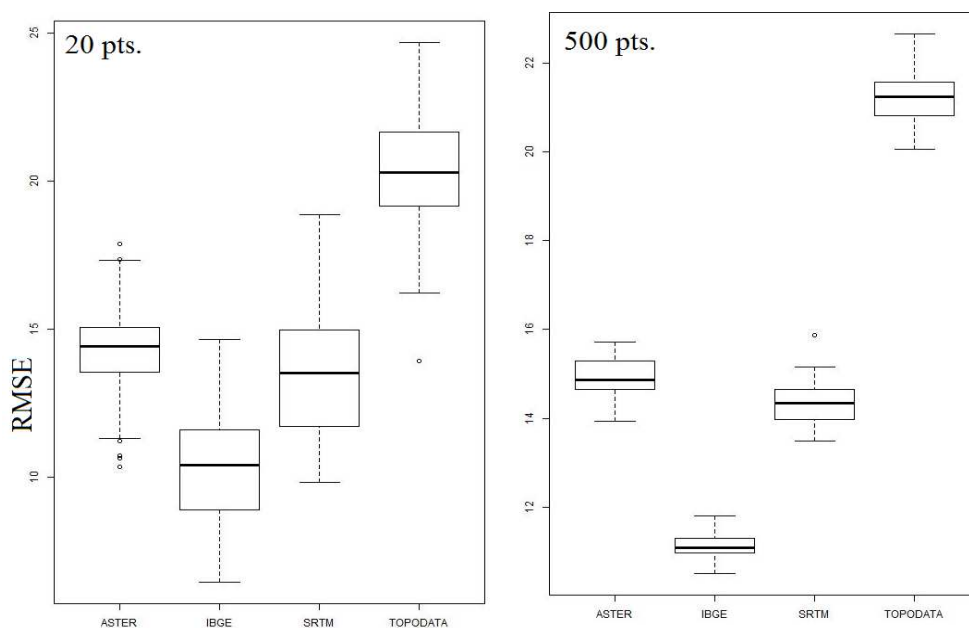


Figura 12 - RMSE dos modelos digitais de elevação testados. RMSE calculado com 20 pontos (gráfico da esquerda) e 500 pontos (gráfico da direita), ambos em 30 repetições.

Os valores de RMSE foram submetidos à análise de variância (ANOVA) para verificar se havia diferença estatística entre os modelos validados. A título de comparação, a ANOVA foi efetuada em duas condições: na primeira, com dados provenientes de uma baixa densidade amostral (20 pontos) e, na segunda, com o tamanho amostral considerado como adequado para a área em específico (500 pontos). Para ambas as situações, a ANOVA indicou que há 99% de probabilidade

da diferença entre os MDEs não ser puramente aleatória. Isto é, há diferença estatística entre as médias dos RMSE dos MDEs avaliados (Tabela 4).

Tabela 4 - Análise de Variância para o erro médio quadrático (RMSE), com dois tamanhos amostrais. NPC: número de pontos de controle.

NPC	Causa da variação	G.L.	Soma dos quadrados	Quadrados médios	F	Valor de p
20	MDE	3	1630,3	543,4	2055,0	<2e-16***
	Resíduos	116	30,7	0,3		
500	MDE	3	1488,4	496,1	107,1	<2e-16***
	Resíduos	116	537,1	4,6		

***significativo a 99% de confiabilidade.

Após a análise de variância, efetuou-se um teste post-hoc para comparar os resultados entre as bases de dados. O teste utilizado foi o Tukey HSD, a 95% de confiabilidade. Em todos os pares de modelos a diferença entre médias foi significativa, portanto a hipótese nula de igualdade pode ser rejeitada (Figura 13). Observando o boxplot (Figura 12), podemos concluir com garantia estatística que os modelos digitais de elevação apresentam RMSE crescente no sentido: IBGE, SRTM, ASTER e Topodata. Embora a diferença entre SRTM e ASTER seja significativa, o valor médio de RMSE dos mesmos é bastante aproximado.

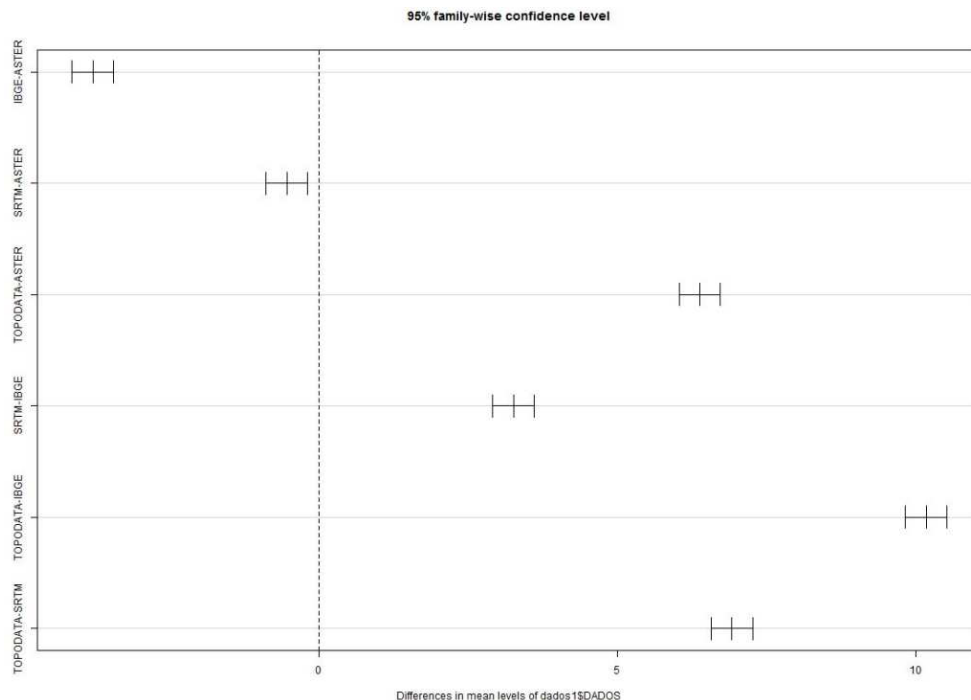


Figura 13 - Diferenças significativas do teste de Tukey-HSD. Pares significativos são aqueles com limite inferior e superior fora da linha. Valores baseados em validação com 500 pontos.

Os resultados do teste de Tukey são apresentados na Tabela 5, onde se verifica a significância das estatísticas.

Tabela 5 - Comparações post hoc pelo teste Tukey-HSD a 95% para médias do RMSE dos MDES. Validação efetuada com 500 pontos de checagem.

Pares	Diferença	Limites		p ajustado
		Inferior	Superior	
IBGE-ASTER	-3,80	-4,14	-3,45	0,00***
SRTM-ASTER	-0,54	-0,89	-0,20	0,00***
TOPODATA-ASTER	6,38	6,03	6,72	0,00***
SRTM-IBGE	3,26	2,91	3,60	0,00***
TOPODATA-IBGE	10,17	9,83	10,52	0,00***
TOPODATA-SRTM	6,92	6,57	7,27	0,00***

***: significativo a 99% de confiabilidade.

A importância do tamanho amostral se comprova nos testes post-hoc. Com apenas 20 pontos de checagem, SRTM e ASTER não poderiam ser considerados diferentes quanto à precisão mensurada pelo RMSE (Figura 14). Nesse sentido, validações comparativas feitas com um número baixo de pontos de checagem somente seriam capazes de diferenciar estatisticamente modelos muito diferentes, pois a grande variabilidade das médias na subamostragem, tornaria a distribuição dos dados mais semelhante (Figura 12).

Constata-se que a recomendação de Merchant (1982) de utilizar, no mínimo, 20 pontos para avaliar a qualidade geométrica de um produto cartográfico, deve ser reavaliada nos dias atuais para validação de modelos digitais de elevação.

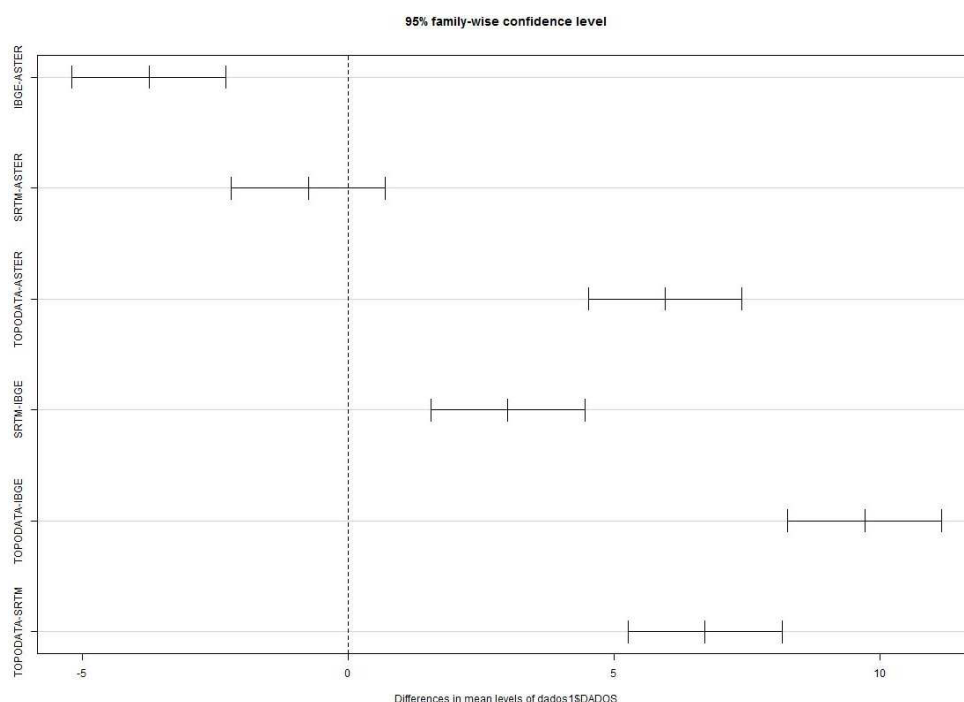


Figura 14 - Diferenças significativas do teste de Tukey-HSD. Pares significativos são aqueles com limite inferior e superior fora da linha. Valores baseados em validação com 20 pontos.

Os valores extraídos do teste Tukey HSD, para a validação com 20 pontos de checagem são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Comparações post hoc pelo teste Tukey-HSD a 95% para médias do RMSE dos MDES. Validação efetuada com 20 pontos de checagem.

Pares	Diferença	Limites		p ajustado
		Inferior	Superior	
IBGE-ASTER	-3,75	-5,20	-2,30	0,00***
SRTM-ASTER	-0,75	-2,20	0,70	0,53
TOPODATA-ASTER	5,96	4,51	7,41	0,00***
SRTM-IBGE	3,00	1,55	4,45	0,00***
TOPODATA-IBGE	9,71	8,26	11,16	0,00***
TOPODATA-SRTM	6,71	5,26	8,16	0,00***

Para determinar um número adequado de pontos de checagem utilizados na validação, utilizou-se o critério da curva do erro padrão da média (Figura 9), de onde selecionamos um tamanho amostral que corresponde a uma zona estável da curva. O número de pontos também poderia ser calculado pela fórmula do tamanho amostral, que levaria a valores aproximados.

Com intuito de confirmar a adequação do tamanho amostral, realizou-se uma validação total dos MDEs, por subtração célula a célula do MDE a ser validado e a base de referência. Os valores de RMSE e EM calculados foram então comparados com a média dos valores obtidos com a amostragem, em 30 repetições com 500 pontos (Figura 15). A estatística utilizada para comparação foi o teste t de Student, onde a hipótese nula (H_0) é que os valores obtidos no censo e na validação por amostragem são iguais, enquanto a hipótese alternativa (H_1) é que há diferença significativa entre as medidas de precisão calculada pelos dois métodos.

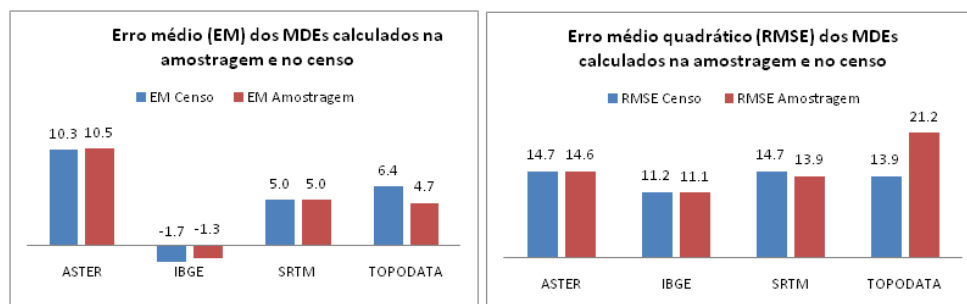


Figura 15 - Comparação das medidas de precisão dos MDEs obtidas na amostragem (média de 30 repetições com 500 pontos) e no censo (validação).

Os resultados do teste t de Student são apresentados na Tabela 7. Conclui-se que o RMSE calculado na amostragem foi adequado para IBGE e ASTER a 90% de confiabilidade, pois pelo valor p calculado não se pode rejeitar a hipótese de igualdade entre os valores obtidos. Entretanto, para SRTM e Topodata, percebe-se que seria necessário um número maior de pontos para a validação, uma vez que a hipótese de igualdade entre os valores pode ser rejeitada a 99% de probabilidade. Para ambos, verifica-se que o RMSE calculado na validação total é inferior àquele obtido na amostragem.

Os resultados do mesmo teste, quando comparamos o RMSE calculado no censo com o da amostragem de apenas 20 pontos, mostram diferença significativa para IBGE, Topodata e SRTM, com valores de p de, respectivamente: 0,029; $3,92 \cdot 10^{-14}$ e 0,002. Isso significa que, para esses MDEs, a validação com esse número de pontos seria insuficiente. Para ASTER, o valor p foi de 0,181, portanto não se pode rejeitar a hipótese nula.

Tabela 7 - Resultados do teste t de Student. Comparação entre o RMSE calculado na validação total e a média obtida na amostragem com 500 pontos.

Dados	G.L	T	Valor testado	I.C a 95%	p-valor ¹
IBGE	29	-1,848	11,1	10,98 - 11,21	0,074 ^{ns}
TOPODATA	29	58,782	14,7	21,01 - 21,53	< 2,2e-16***
SRTM	29	-5,620	13,9	14,15 - 14,55	4,3e-6***
ASTER	29	2,337	14,7	14,72 - 15,06	0,026**

1: **: significativo a 95%, ***: significativo a 99%, ns: não significativo.

Para além da significância dos testes, é interessante verificar a variação do valor p calculado nas duas abordagens, pois o mesmo nos dá uma indicação da confiabilidade da estatística. Para IBGE, por exemplo, uma baixa densidade amostral nos levaria a concluir que o RMSE calculado no censo e na amostragem são diferentes. Todavia, um maior número de amostras indica que na verdade eles são iguais, o que configura um erro do tipo 1 (rejeitar a hipótese nula quando a mesma é verdadeira). Por outro lado, para ASTER, pela baixa densidade amostral concluir-se-ia que as medidas são iguais, quando na verdade elas são diferentes (erro do tipo 2). Giacomini et al. (2014) também constataram a importância do tamanho amostral, ao verificar os diferentes padrões de exatidão cartográfica obtidos ao usar baixa e alta densidade amostral.

O maior valor de RMSE, observado para TOPODATA, pode estar associado às falhas sistemáticas presentes na cena estudada. As mesmas se apresentam na forma de uma grade regular, com inclinação no sentido sudeste-nordeste, as quais foram mais evidentes nos derivativos da altitude (Figura 16). Falhas sistemáticas nesse produto também foram verificadas por Samuel-Rosa et al. (2014). É possível que esse erro sistemático seja proveniente da missão SRTM, tendo sido potencializado na krigagem. De fato, a órbita da missão SRTM apresenta inclinação semelhante às falhas observadas na cena.

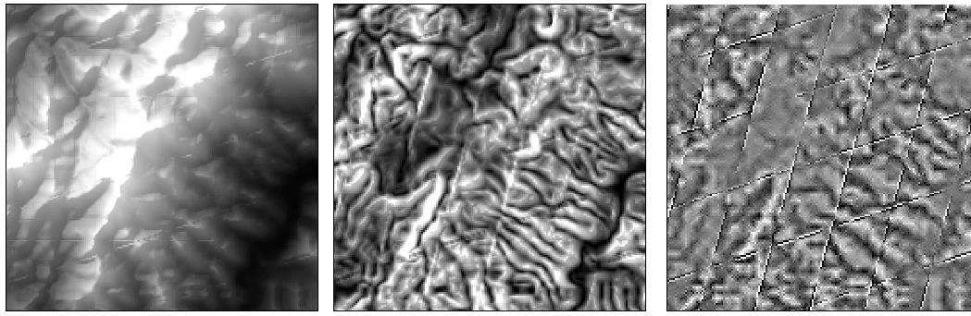


Figura 16 - Visualização de erros sistemáticos presentes nos dados Topodata, respectivamente nos modelos de: elevação, declividade e curvatura.

Para fins comparativos, apresentam-se os valores de RMSE, obtidos nesse e em outros trabalhos, em diferentes situações (Tabela 8). Conforme visto na tabela, os valores obtidos na pesquisa estão dentro da média observada na literatura. Embora o RMSE seja um índice prático para comparação, a não padronização do tamanho amostral e a grande variação dos dados de referência utilizados, faz com que a comparação seja pouco informativa.

Tabela 8 - RMSE obtido na pesquisa com 500 pontos de checagem e comparação com os valores encontrados na literatura:

MDE	Autor	RMSE	Local	Observação
	Dados da pesquisa	13,9		
SRTM	Costa et al. (2010)	7,7	CE - Brasil	Vegetação arbustiva
	Costa et al. (2010)	14,0	CE- Brasil	Vegetação florestal
	Santos et al. (2006)	7,64	AM - Brasil	
	Gesch (1999)	3,5	EUA	SRTM com 30m de resolução espacial
	Miceli et al. (2011)	11,1	AM - Brasil	
	Medeiros et al. (2009)	11,0	GO - Brasil	
	Samuel-Rosa et al (2014)	18,7	Brasil	
	Dados da pesquisa	21,2 (13,9*)		* valor obtido no censo
TOPODATA	Miceli et al. (2011)	10,9	AM - Brasil	
	Samuel-Rosa et al. (2014)	19,0	Brasil	
	Cinquini et al. (2014)	11,26	Oeste de SP - Brasil	
	Dados da pesquisa	14,6		
ASTER	Miceli et al. (2011)	15,7	AM - Brasil	
	Rodrigues et al. (2010)	16,0	Leste do PR - Brasil	
	Giacomin et al (2014)	24,5	Barão de Cocais - MG	Mesmo área de estudo do presente trabalho
	Oliveira & Paradella (2009)	9,92	AM - Brasil	
	Cinquini et al. (2014)	11,42	Oeste de São Paulo - Brasil	
	Dados da pesquisa	11,00		
IBGE	Medeiros et al (2009)	15,00	GO - Brasil	Carta topográfica na escala 1:100.000
	Medeiros et al (2009)	18,00	GO - Brasil	Carta topográfica na escala 1:100.000
	Cinquini et al. (2014)	12,40	Oeste de SP - Brasil	

3.3 Padrão de exatidão cartográfica

Os modelos digitais de elevação foram classificados quanto ao Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) no software GeoPEC, que também realiza testes de normalidade dos dados e verifica a presença de erros sistemáticos. Como resultado, temos uma escala de trabalho adequada para cada modelo, em um dado PEC. O resultado da análise é exibido na Tabela 9, onde é apresentada, para cada MDE, a escala mais detalhada que atingiu, no mínimo, o padrão classe B. A classificação segundo o PEC é destoante da validação onde se calculou o RMSE. Isso porque o primeiro método leva em conta outras estatísticas que consideram a normalidade dos erros, a presença de tendências de erros de estimativa e a frequência acumulada de erros até o limite de 90%.

Tabela 9 - Padrão de exatidão cartográfica (PEC) dos modelos digitais de elevação. Somente os melhores resultados são apresentados.

Dados	Normalidade dos erros	Erro sistemático	PEC	Escala	Equid. Vertical	Outliers
IBGE	Sim	Sim	Classe B	1/75.000	30m	1
ASTER	Não	Sim	Classe B	1/100.000	50m	2
TOPODATA	Sim	Sim	Classe B	1/100.000	50m	5
SRTM	Não	Sim	Classe A	1/200.000	100m	0

A normalidade da distribuição dos erros de estimativa também é testada pelo software. Embora use o teste de Kolmogorov-Smirnov, os resultados corroboram com os obtidos anteriormente com o teste de Shapiro-Wilk, de onde se concluiu que os erros de estimativa nos modelos ASTER e SRTM não apresentam distribuição normal. Todos os modelos avaliados apresentaram erros sistemáticos, segundo o teste t de Student para tendências.

O modelo que obteve melhores resultados quanto ao PEC foi o IBGE, que atingiu classe B na escala 1:75.000 para curvas com equidistância vertical de 30 metros. Nota-se que o padrão observado é inferior à escala nominal do produto (1:50.000 e curvas com 20m de equidistância vertical). ASTER e Topodata apresentaram o mesmo resultado (com exceção da normalidade dos erros), atingido classe B na escala 1:100.000 e curvas de nível com equidistância vertical de 50m. Já o modelo SRTM atingiu PEC classe A na escala 1:200.000, sendo adequado para produzir curvas de nível com 100 metros de equidistância vertical. Barros (2006) noticia um PEC Classe A, na escala 1:100.000, para os MDEs SRTM e ASTER.

Souza & Loch (2007) apontam que o georreferenciamento dos dados SRTM podem melhorar consideravelmente a qualidade dos dados, os quais

atenderam o PEC classe A na escala 1:250.000, sem correção geométrica e PEC Classe B na escala 1:50.000, após o georreferenciamento. Contudo, o georreferenciamento dos MDEs, com dados de campo, é bastante complexo na prática, sobretudo em estudos de grandes extensões.

Costa et al. (2010) usaram dados do IBGE como referência de campo e verificaram que vegetações mais densas, com altura média do dossel superior a 6m, contribuem significativamente para maiores erros altimétricos no MDE SRTM. Todavia, os autores citam que, em sua área de estudo, essa vegetação está associada a relevos mais irregulares e maiores altitudes, portanto os maiores erros altimétricos nesses locais também podem ser associação entre a vegetação e o próprio relevo. O padrão de exatidão cartográfico, obtido por Costa et al. (2010) para cada classe de vegetação, foi diferente em vegetações mais ou menos densas (arbóreas e arbustivas, respectivamente. Na vegetação mais densa estudada por eles (Matas Úmidas), os dados altimétricos não foram enquadrados em nenhum PEC, na escala 1:100.000.

Miceli et al. (2011) avaliaram a precisão vertical de MDEs gratuitos no Brasil (ASTER, SRTM 1 e 4, EMBRAPA e TOPODATA), em duas situações topográficas distintas: um relevo suave (Amazônia) e um relevo montanhoso (Petrópolis). No primeiro caso, obtiveram PEC classe A na escala 1:100.000, mas nenhum dos modelos atendeu a escala 1:50.000 na classe C. Já no segundo caso, somente o MDE TOPODATA obteve classe A na escala 1:100.000. Já Rodrigues et al. (2010) encontraram PEC Classe A na escala 1:100.000 para ASTER GDEM, avaliando uma cena localizada no leste do estado do Paraná. Todavia, um baixo número de pontos de controle foi utilizado para validação.

Em relevos mais planos, como no estado de Goiás, Medeiros et al. (2009) obtiveram PEC Classe A na escala 1:100.000 para SRTM. Já o PEC dos MDEs produzidos a partir da base cartográfica do IBGE (escala 1:100.000) por interpolação, no mesmo estudo, foram classificados na Classe B, também na escala 1:100.000. Desta forma, os dados de sensoriamento remoto são uma boa alternativa, para regiões onde o levantamento sistemático do IBGE não se encontra disponível na escala 1:50.000.

Para Giacomini et al. (2014), os dados ASTER GDEM 2 poderiam ser utilizados na escala 1:250.000, enquanto Rodrigues et al. (2010) concluíram que os mesmos dados são adequados para mapeamentos sistemáticos em escala 1:100.000.

A grande variabilidade de resultados vistos em literatura reitera a necessidade de estudos específicos de validação. Padrões diferentes de qualidade cartográficas podem ser obtidos para um mesmo produto em regiões diferentes.

3.4 Propagação da incerteza pelos derivativos da altitude

Além da validação considerando a altitude estimada nos MDEs, os mesmos também foram qualificados quanto aos derivativos da altitude, nomeadamente: declividade, face de exposição e curvatura. Para tal, foi apurada a correlação entre esses derivativos, gerados pelos MDEs avaliados, e a aqueles gerados pelos dados de referência (LIDAR). Como discutido anteriormente, a propagação dos erros a partir do MDE é potencializada na produção de derivativos de menor ou maior ordem. Diante dessa realidade, o melhor modelo será aquele no qual os derivativos do relevo guardam melhor correlação com a verdade de campo. Em primeiro lugar, apresentam-se os gráficos beanplots da distribuição dos dados de altitude, declividade, direção da vertente e curvatura nos diferentes modelos (Figura 17).

Através da visualização da distribuição dos dados, percebe-se que há maior ou menor semelhança a depender do modelo analisado. Nos modelos digitais de elevação, a distribuição dos dados é bastante semelhante, enquanto nos derivativos de maior ordem, principalmente a declividade, há maiores discrepâncias nas distribuições. Nesses últimos, os dados SRTM e Topodata apresentam maior concentração de valores em torno do centro da distribuição, o que conota uma suavização do relevo por esses modelos.

A propagação dos erros pelos derivativos da altitude foi confirmada pelo coeficiente de correlação, na medida em que há reduções consideráveis do mesmo quando da produção de derivativos de primeira ordem (declividade e face de exposição) e, ainda em maior grau, nos derivativos de segunda ordem (curvatura). A propagação dos erros também é ilustrada pelo aumento da dispersão dos dados em torno da reta, como é visto na Figura 18.

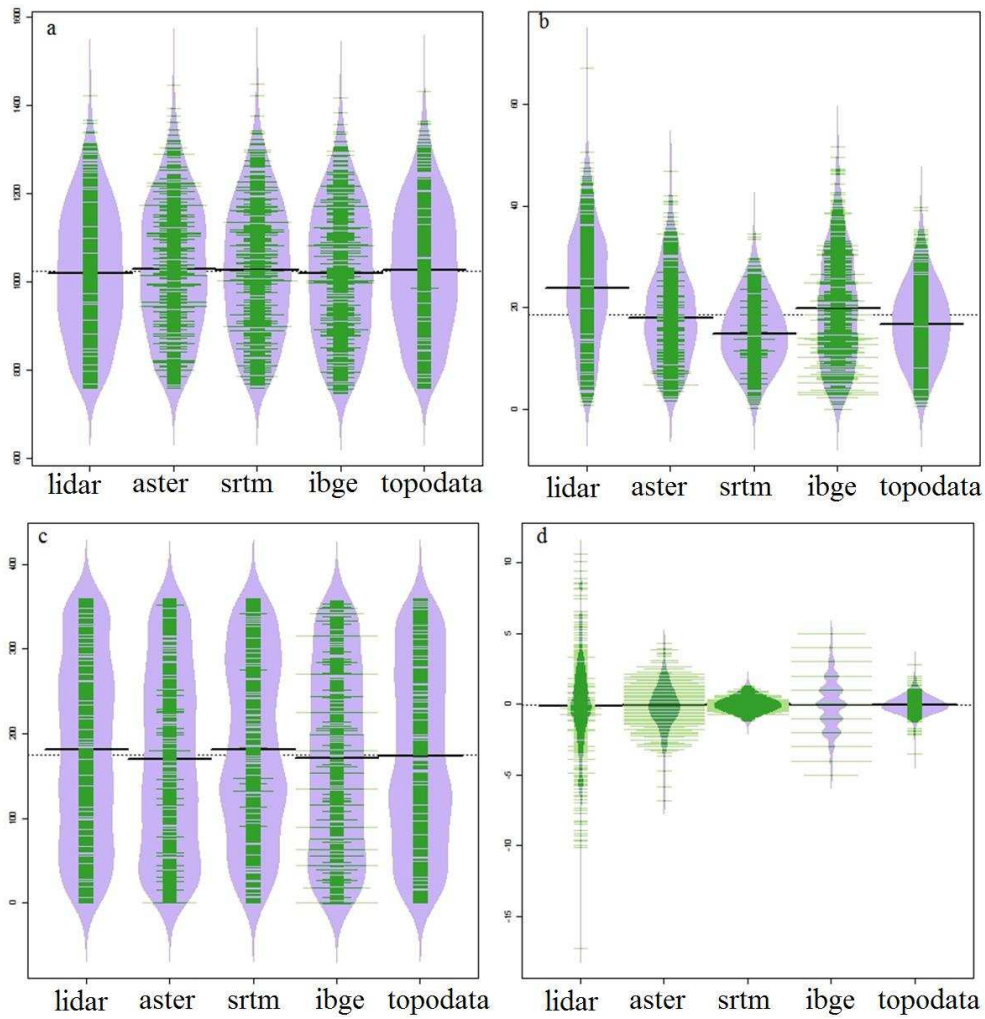


Figura 17 - Beanplots. Distribuição dos valores dos dados LIDAR, ASTER, SRTM, IBGE e Topodata para os modelos de: (a) altitude, (b) declividade, (c) direção da vertente e, (d) curvatura.

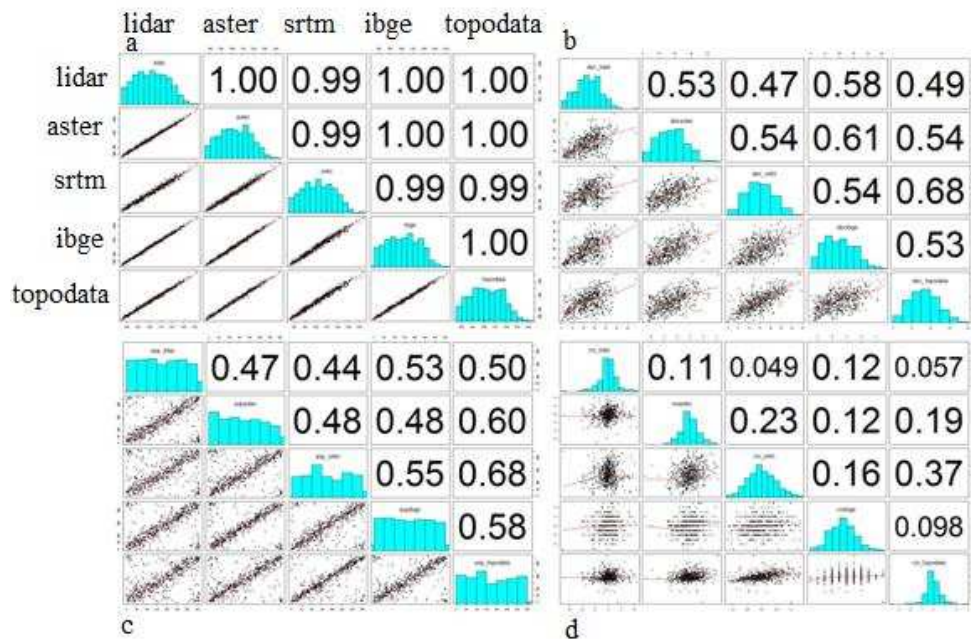


Figura 18 - Correlação de Pearson entre variáveis dos MDEs e da referência. a) altitude; b) declividade, c) face de exposição e, d) curvatura.

Para a variável altitude, há correlação perfeita e positiva entre todos os modelos e a base de referência. Isso porque, embora haja erros de estimativa, ao considerar a escala dos dados eles se tornam pequenos, de forma que os modelos acompanham a variação da superfície de forma geral. Por exemplo, o maior erro de estimativa verificado pontualmente foi de 74 metros para os dados SRTM. Embora seja um erro bastante expressivo em termos de altitude, é relativamente baixo ao considerar a amplitude dos dados (Tabela 1), correspondendo a um erro percentual de 10,5%. A razão entre o RMSE do mesmo modelo e a amplitude da altitude na área de validação ($RMSE/[Z_{max}-Z_{min}]*100$) é de apenas 1,86%. Dessa maneira, a correlação entre as altitudes dos modelos não se apresenta como um critério eficiente de qualificação de MDEs. Erdogan (2010), por exemplo, também encontrou correlações superiores a 0,9 usando diferentes métodos de interpolação e densidade de dados.

A média dos coeficientes de correlação entre os modelos e a referência foi de 0,99 para altitude, 0,51 para declividade, 0,48 para face de exposição e 0,084 para curvatura. Em estudos que objetivam mapear áreas declivosas, a perda de informações na produção do mapa de declividade é bastante prejudicial. A propagação dos erros afeta em maior grau os cálculos de atributos do terreno que envolvem um grande número de células, onde até mesmo um valor baixo de erro pode afetar fortemente os derivativos como a declividade, fluxo acumulado, índice de umidade (Holmes et al. (2000). Conseqüentemente, as análises subsequentes que utilizam esses dados estão comprometidas.

A propagação dos erros pelos derivativos da altitude, obtida dos MDEs, é estudada por Oksanen & Sarjakoski (2005), os quais ressaltam que pouca atenção tem sido dada a essa questão. De fato, pouca pesquisa foi realizada sobre o assunto, com dados disponíveis no Brasil.

3.5 Precisão dos MDEs e declividade do terreno

O modelo digital de declividade (MDD) foi gerado a partir dos dados LIDAR e, a partir dele, a área foi classificada pela declividade segundo EMBRAPA (1979) (Figura 19). A classe de relevo forte ondulado é a mais representativa da área, ocupando 53,87 km², mais de 50% da área de validação. As áreas classificadas como planas são as menos abundantes, ocupando apenas 1,75 km² (Tabela 10). Não foram encontradas áreas com declividade superior a 75° (relevo escarpado).

Por cada classe de declividade foi calculada, em cada repetição, os valores médios e o desvio padrão, da diferença absoluta entre valores estimados (Z_{mde}) e observados (Z_{ref}). Os resultados foram tabulados numa única planilha para execução dos testes estatísticos. Utilizaram-se os pontos provenientes de 30 repetições com 500 observações cada, totalizando 15.000 pontos. Essa super amostragem foi feita para assegurar que classes de declividade com áreas reduzidas também fossem devidamente amostradas.

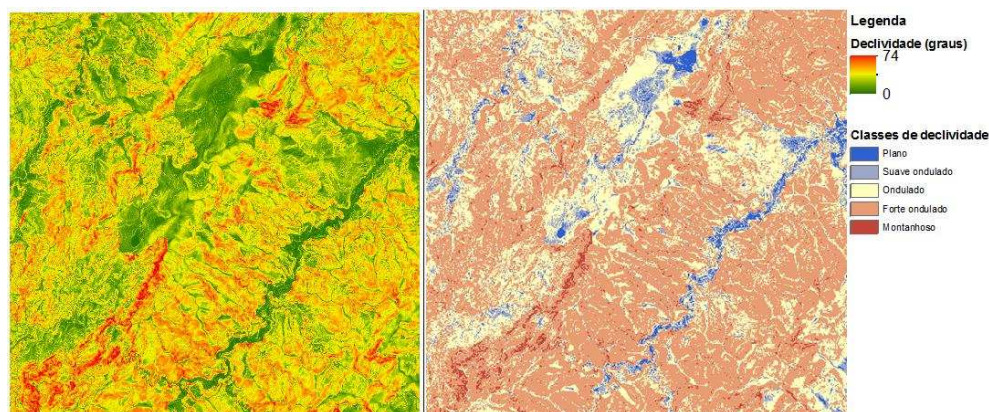


Figura 19 - Mapa de declividade do terreno e mapa de classes de declividade segundo EMBRAPA (1979).

Pela análise exploratória dos dados, verificou-se que há uma tendência de aumento nos desvios seguindo o aumento de declividade do terreno (Figura 20). Os MDEs testados apresentam influência da declividade e os produtos possuem sensibilidades diferentes quanto à variação da mesma. O MDE gerado com os dados do IBGE apresentou menor média dos desvios em todas as classes de declividade. Em relevo plano e suave ondulado, SRTM e IBGE são bastante semelhantes entre si, apresentando maiores diferenças em relevos mais inclinados. O MDE Topodata apresentou os maiores valores de desvios, exceto na classe de relevo plano, onde o MDE ASTER teve desempenho inferior a ele, ainda que a diferença seja pequena. Esses resultados não corroboram com Miceli et al. (2011). Embora os autores também tenham confirmado a influência da declividade na precisão dos MDEs, observaram melhor desempenho do MDE Topodata em relação à SRTM e ASTER em relevos montanhosos.

Entre ASTER e SRTM, há uma particularidade quando tratamos da declividade do terreno. Em regiões de baixa frequência (relevo plano), os dados SRTM se mostraram mais precisos que o primeiro. O MDE ASTER por sua vez é menos influenciado pela declividade do terreno, de forma que em regiões de alta frequência (relevo montanhoso), esse modelo apresentou maior precisão em relação ao anterior.

Tabela 10 – Áreas ocupadas por classe de declividade e valor médio encontrado para os desvios absolutos ($d = |Z_{mde} - Z_{ref}|$) nas 30 repetições com 500 pontos cada; n = número total de pontos amostrados por classe de relevo.

Classe de Relevô	Declividade (°)	Área (km ²)	n	d (médio)			
				IBGE	TOPODATA	SRTM	ASTER
Plano	0 – 3	1,75	299	5,52	8,94	6,55	9,55
Suave Ondulado	3 – 8	5,88	960	7,22	11,72	8,22	10,34
Ondulado	8 – 20	26,95	4443	7,47	14,46	9,36	11,34
Forte Ondulado	20 – 45	53,87	8980	9,45	18,73	12,20	12,88
Montanhoso	45 – 75	1,80	318	12,78	22,05	17,52	14,46
Escarpado	> 75	0	0	-	-	-	-

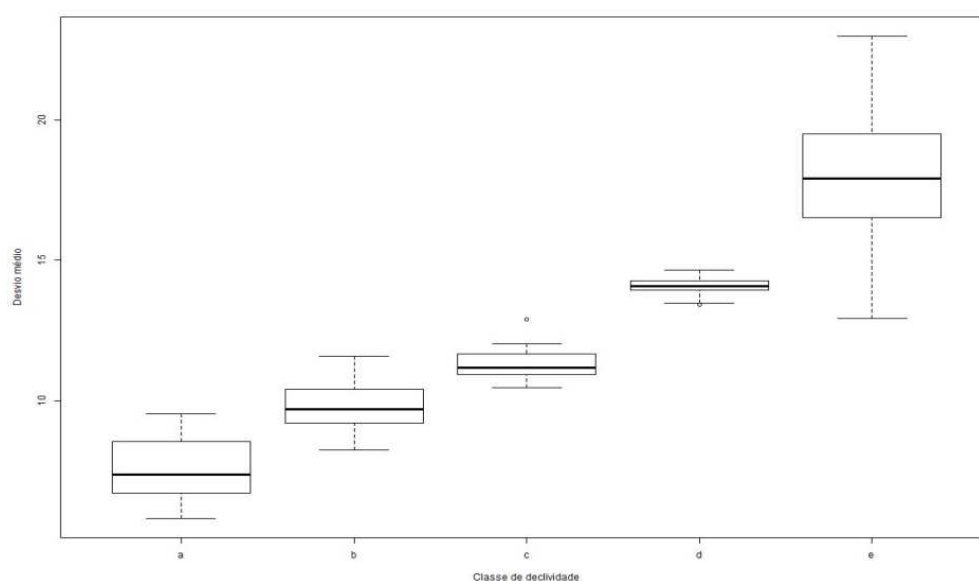


Figura 20 - Desvio médio por classes de declividade nos modelos digitais de elevação testados. Valores médios de todos os modelos. Classes de declividade (EMBRAPA, 1979): (a) plano; (b) suave ondulado; (c) ondulado; (d) forte ondulado; (e) montanhoso.

Para verificar a influência da declividade na precisão dos modelos digitais de elevação, os dados foram submetidos à análise de variância, considerando a classe de declividade como fator e o desvio médio como variável resposta. O teste foi feito entre classes de declividade, para as médias dos desvios nos MDEs e entre bases de dados por classe de declividade.

A significância das diferenças entre as médias obtidas em cada classe de relevo foi verificada em análise post-hoc através do teste-t Tukey HSD, a 95% de confiabilidade. Os modelos IBGE e SRTM apresentaram quatro subgrupos estatisticamente distintos, sendo que as médias dos desvios obtidos nos relevo suave ondulado e ondulado não se diferem (Tabela 11) em cada uma delas. O MDE ASTER se mostrou menos influenciado pelo aumento da declividade do terreno em relação aos demais, pois apresentou incrementos menores para a média dos desvios com o aumento da declividade. Somente no relevo forte ondulado e montanhoso os

desvios de estimativa foram significativamente distintos das demais classes de relevo, para esse modelo. A maior sensibilidade do MDE Topodata em relação ao aumento da declividade é observada ao constatar-se que os desvios de estimativa em cada classe de declividade do mesmo apresentaram médias significativamente distintas.

Tabela 11 - Análise de variância dos desvios médios, em metros. Subgrupos estatísticos para médias dos desvios de todos MDEs, entre as classes de relevo e entre classes de relevo em cada MDE avaliado.

Relevo	IBGE	Topodata	SRTM	ASTER
Plano	5,1 Aa	8,53 Aa	6,0 Aa	9,13 Aa
Suave Ondulado	6,77 Bb	11,17 Bb	7,7 Bb	9,8 Ba
Ondulado	7,0 Cb	13,93Cc	8,83 Cb	10,86 Ca
Forte Ondulado	8,9 Dc	18,20 Dd	11,63 Dc	12,36 Db
Montanhoso	12,2 Ed	21,56 Ee	17,0 Ed	14,0 Ec

*Médias seguidas da mesma letra não se diferem pelo teste Tukey HSD a 95% de significância. Letra maiúscula: teste de médias entre classes de relevo (linhas), letra minúscula: teste de médias entre classes de relevos por base de dados (colunas).

Os resultados confirmam que a precisão dos MDEs é afetada pela declividade do terreno, independente do modelo avaliado. Além disso, o comportamento dos modelos é variado quanto ao aumento da altitude. Medeiros et al. (2009) também confirmam a influência da declividade na precisão do MDE SRTM, tendo verificado RMSE variando de 17m em relevo plano a 52m em relevo montanhoso.

3.6 Resolução espacial e precisão dos MDEs

A perda de informações e a propagação dos erros nos derivativos da altitude, a exemplo da declividade, é bastante abordada na literatura e consiste em um problema inerente aos modelos digitais de elevação. Além da técnica de obtenção dos dados e do seu tratamento, que determinam a qualidade do produto final, o tamanho da célula do MDE é um fator limitante na sua capacidade de representação do relevo.

Para melhor compreender o comportamento dos MDEs em função da sua resolução, foram feitas análises a partir de MDES construídos com dados LIDAR, reduzindo seu tamanho de célula. Para tal, o MDE LIDAR utilizado como referência, com resolução espacial de 2m, foi transformado em pontos e esses por sua vez foram utilizados para criar MDEs com resolução mais baixa, onde o valor da altitude corresponde à média dos valores observados na respectiva área. A partir desses MDEs, foram criados os MDDs utilizados na análise.

Os resultados da correlação confirmam que o tamanho de célula é determinante na capacidade dos MDEs representarem a declividade do terreno, como é observado na Figura 21. Na medida em que o tamanho da célula aumenta, há redução na correlação entre a declividade estimada pelos modelos e a referência.

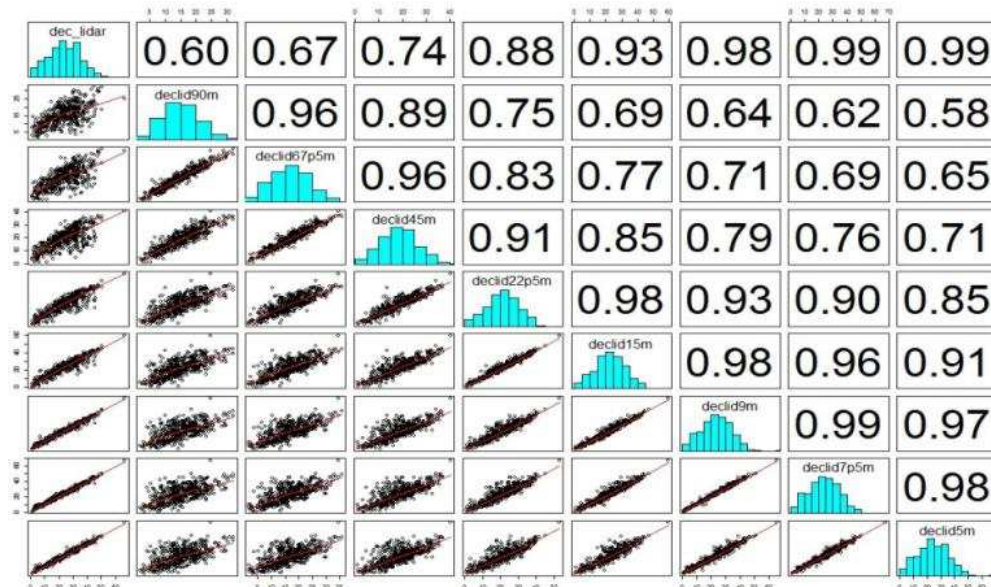


Figura 21 - Coeficientes de correlação de Pearson entre os modelos digitais de declividade (MDD) de diferentes resoluções gerados a partir dos dados LIDAR.

Foi modelada uma regressão linear entre a resolução do modelo digital de declividade e a sua correlação com a verdade de campo, no software R. Os coeficientes são significativos a 95% de confiabilidade e os resíduos apresentam distribuição normal. As estatísticas relativas à construção do modelo são expostas na Figura 22 e a distribuição dos erros do modelo na Figura 23.

A regressão modelada, para a amplitude de resoluções estudada (5 a 90 m), é dada pela função $Y = 1,00636 - 0,00486X$, sendo Y o coeficiente de correlação e X o tamanho de célula do MDE (Figura 24). Essa função pode ser aplicada em relevos semelhantes ao da área de estudo do presente trabalho. Locais mais movimentados, ou mais planos, teriam funções com diferentes coeficientes. Espera-se que MDEs de locais mais planos sejam menos afetados pelo tamanho da célula, resultando numa menor inclinação da reta.

```

lm(formula=      y      ~      x)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.04766 -0.01049  0.002238  0.018056  0.03104

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  1.006362   0.014212   70.81 5.34E-10 ***
x            -0.00486   0.000322  -15.09 5.34E-06 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1

Residual standard error: 0.027 on 6 degrees of freedom
Multiple R-squared: 0.9743, Adjusted R-squared: 0.97
F-statistic: 227.7 on 1 and 6 DF, p-value: 5.34E-06

Shapiro-Wi normality test

data:  rstudent(model)
W      = 0.9467, p-value = 0.6782

```

Figura 22 - Resultados das estatísticas usadas no delineamento da regressão linear e teste de normalidade dos resíduos pelo teste Shapiro-Wilk.

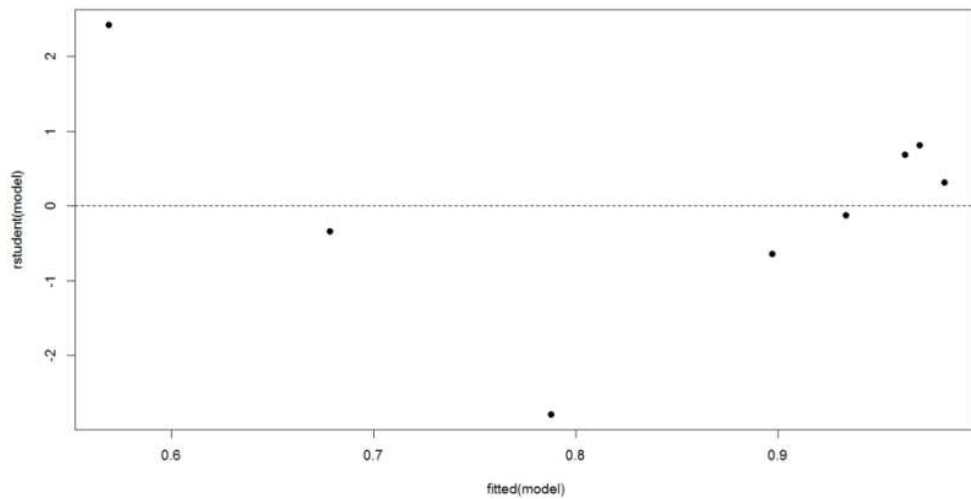


Figura 23 - Distribuição dos erros de estimativa do modelo de regressão linear ajustado.

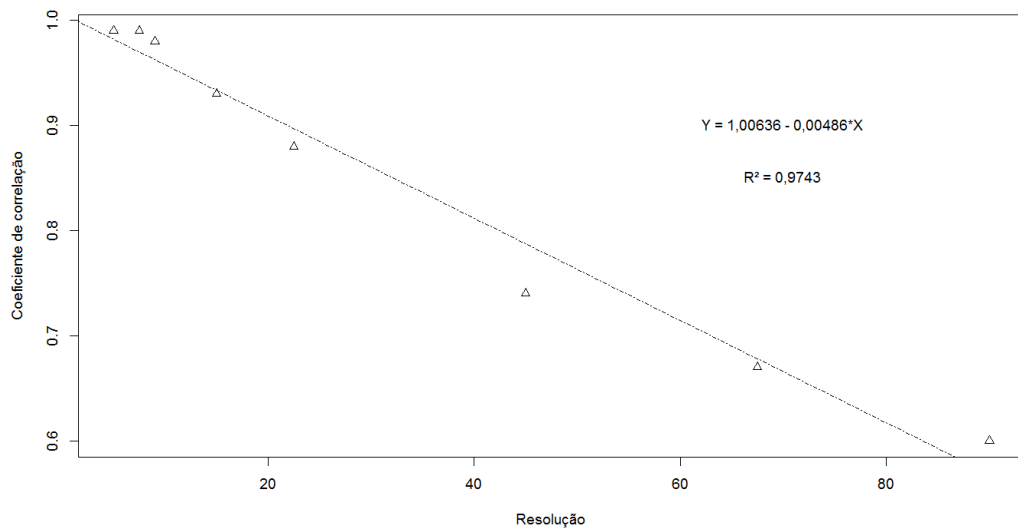


Figura 24 - Regressão linear. Coeficiente de correlação entre a declividade de um MDD e a verdade de campo em função da resolução do modelo.

Os resultados confirmam que a resolução dos MDEs determina a precisão dos MDDs produzidos a partir deles. Mas, o que de fato leva a menores correlações entre um MDD de baixa resolução e a verdade de campo? Como se pode observar na Figura 25, há uma grande diferença na distribuição dos dados entre MDDs de baixa e alta resolução.

Essa distinção é dada, principalmente, pelos seguintes motivos: a) a perda de valores extremos de declividade, que não são representados em resoluções mais baixas e, b) a concentração na distribuição de valores em torno da média, o que denota uma forte suavização do relevo. Os resultados mostram, por exemplo, que tamanhos de células superiores a 9x9 metros não foram capazes de representar declividades acima de 60 graus. O modelo com 90x90m de resolução apresenta suavização bastante pronunciada, onde a declividade máxima não ultrapassa os 40 graus. Embora a perda de informações também ocorra em locais planos, é muito mais forte para valores altos de declividade. Por essa razão, há uma redução do valor médio da declividade nos modelos de resolução mais baixa.

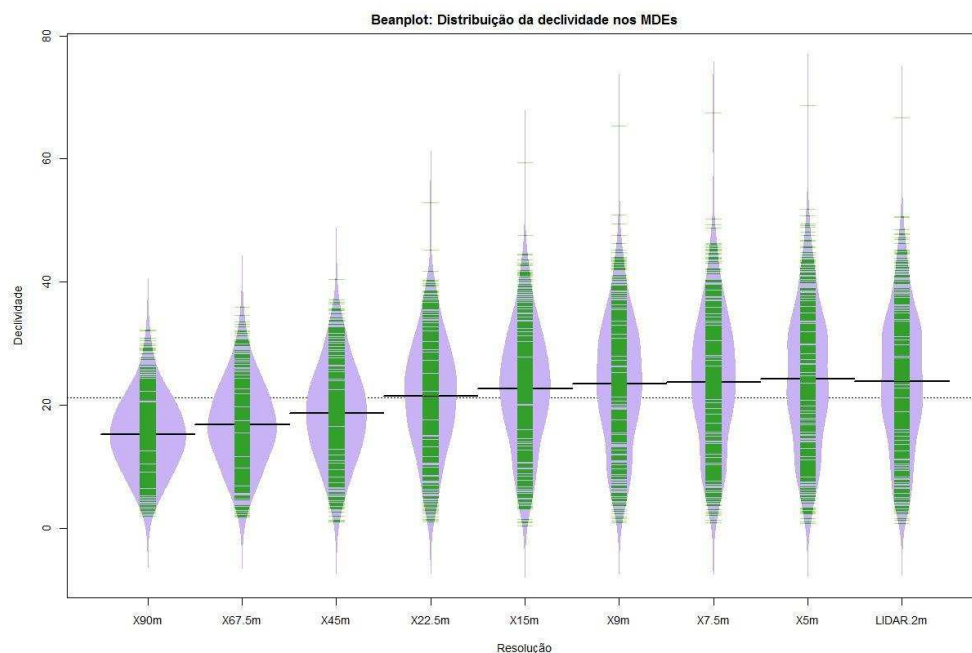


Figura 25 - Beanplots com a distribuição da declividade em matrizes com resoluções crescentes, construídas a partir dos dados LIDAR.

Um exemplo prático do impacto do tamanho de célula em um mapeamento, é referente às áreas de preservação permanente em encostas (ou parte destas) com declividade superior a 45 graus. Comumente, o mapeamento feito com MDEs de baixa resolução leva a uma forte subestimação dessas APPs, ou mesmo à conclusão equivocada de que não há APPs em encostas numa determinada região. Entretanto, esses resultados são efeito da resolução do modelo utilizado, os quais não poderiam ser considerados adequados para tal finalidade.

Alvares & Henkes (2012) apontam que o MDE SRTM não é viável para delimitação de APPs em encostas, uma vez que apresenta forte suavização do relevo, não preservando as feições geomorfológicas da superfície, como encostas e topos de morros. O efeito da resolução no total mapeado de APPs em encostas utilizando-se MDEs com diferentes tamanhos de células é ilustrado na Figura 26.

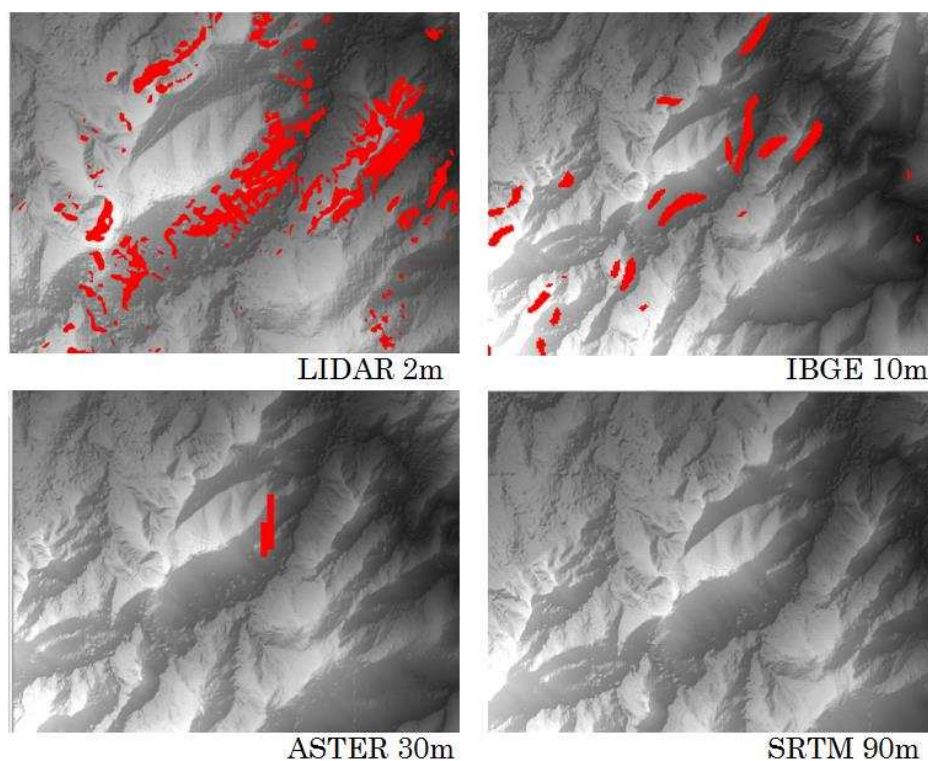


Figura 26 - Locais com declividade superior a 45° (em vermelho) mapeados por MDDs derivados de MDEs com diferentes resoluções espaciais. Representação do relevo pelo MDE LIDAR sombreado, com 2m de resolução espacial.

Sabendo da importância da resolução dos MDEs no cálculo da declividade, caberá ao analista decidir qual limite definirá um modelo como aceitável ou não para seu desígnio. Do exposto, vemos que MDEs com resoluções baixas não são adequados para o mapeamento de áreas declivosas, pois valores altos de declividade não são representados.

3.7 Distribuição espacial dos erros de estimativa

Através de geoestatísticas, buscou-se modelar a distribuição espacial dos erros na área de validação dos MDEs. A geoestatística considera não somente o valor dos pontos (atributos), mas também sua posição geográfica. A distribuição dos valores pode ter três padrões de autocorrelação espacial: disperso, agrupado ou aleatório. O grau de agrupamento e a sua significância foram mensurados globalmente e localmente pelo índice I de Moran (Isaaks & Srivastava, 1989). Sendo uma estatística inferencial, os resultados da autocorrelação espacial são

interpretados dentro do contexto da hipótese nula, a qual estabelece que o atributo analisado tenha distribuição aleatória nas feições dentro da área estudada (ESRI, 2013).

Como distância limite para a análise, determinou-se um valor correspondente a três vezes o tamanho de célula do MDE avaliado. Dessa forma, são considerados no cálculo do índice, todos os pontos presentes num círculo de raio igual à dimensão de três células do MDE. Determinou-se como relação espacial entre os atributos o inverso da distância, onde feições mais próximas têm influência maior sobre o cômputo do que aquelas mais distantes.

Os resultados da análise de autocorrelação espacial global (Tabela 12), dada pelo índice I de Moran, apontam que a distribuição dos valores de erros é agrupada em todas as bases de dados avaliadas, onde a hipótese nula (H_0 : a distribuição dos valores aleatória) foi rejeitada a 99% de probabilidade. A alta significância das estatísticas aponta um forte agrupamento de valores semelhantes de desvios de estimativa.

Tabela 12 - Resultados da análise de autocorrelação espacial global.

	I observado	I esperado	z-score	p-value	Padrão	Distância
ASTER	0,60	0,00	636,56	0	Agrupado	90m
IBGE	0,91	0,00	3003,03	0	Agrupado	30m
TOPODATA	0,65	0,00	716,14	0	Agrupado	90m
SRTM	0,31	0,00	103,96	0	Agrupado	270m

A análise de autocorrelação espacial local (Anselin, 1995) é usada para verificar a existência de agrupamentos, ou clusters, de valores altos (hot spots), valores baixos (cold spots) e outliers. Para o caso do presente estudo, a variável utilizada como atributo é o erro de estimativa, em valor absoluto. Assim, agrupamentos de valores altos significam regiões onde há erro sistemático do modelo digital de elevação, com grandes desvios de estimativa, enquanto clusters de baixo valor são áreas onde os modelos apresentam maiores acertos, ou estimativas mais próximas da realidade. A espacialização dos resultados dessa estatística, permite verificar a correlação dos de erros de estimativa com feições topográficas, ou com o tipo de cobertura do solo. O padrão agrupado dos erros de estimativa, também é relatado por Gao (1997), Fisher (1998), Holmes et al. (2000) e Erdogan (2009), entre outros.

A estimativa da altitude nos MDS é influenciada pelos objetos presentes na paisagem, daí esperam-se maiores erros em regiões de vegetação densa e de maior porte e estimativas mais precisas em locais de vegetação rasteira, como pastagens,

ou de solo exposto. Conforme discutido, a heterocedasticidade (alta variabilidade local de valores) também leva a maiores erros de estimativa, razão pela qual se espera menor precisão em locais de relevo mais movimentado e com variações abruptas (alta frequência). Carlisle (2009) mostra que a magnitude e a distribuição dos erros em um MDE são relacionadas com o caráter variável do relevo. A relação varia de acordo com o tipo do terreno, a resolução do MDE e o seu método de produção.

Os resultados visuais da análise de cluster mostram que os valores de erros de estimativa são fortemente associados com a orientação das feições geomorfológicas e com a textura do terreno (Figura 27). Em geral, há agrupamento de valores altos de desvios de estimativa (erros) próximos as redes de drenagem de ordem mais baixa (nas cabeceiras), onde as mesmas são mais aprofundadas, nas ravinas e encostas menos aplainadas. Os clusters de baixos valores estão associados aos terraços fluviais, encostas suaves e topos aplainados (Figura 28). Clusters de erros de estimativa também foram verificados por Erdogan (2010), em partes do terreno que apresentaram maior rugosidade, como nas encostas.

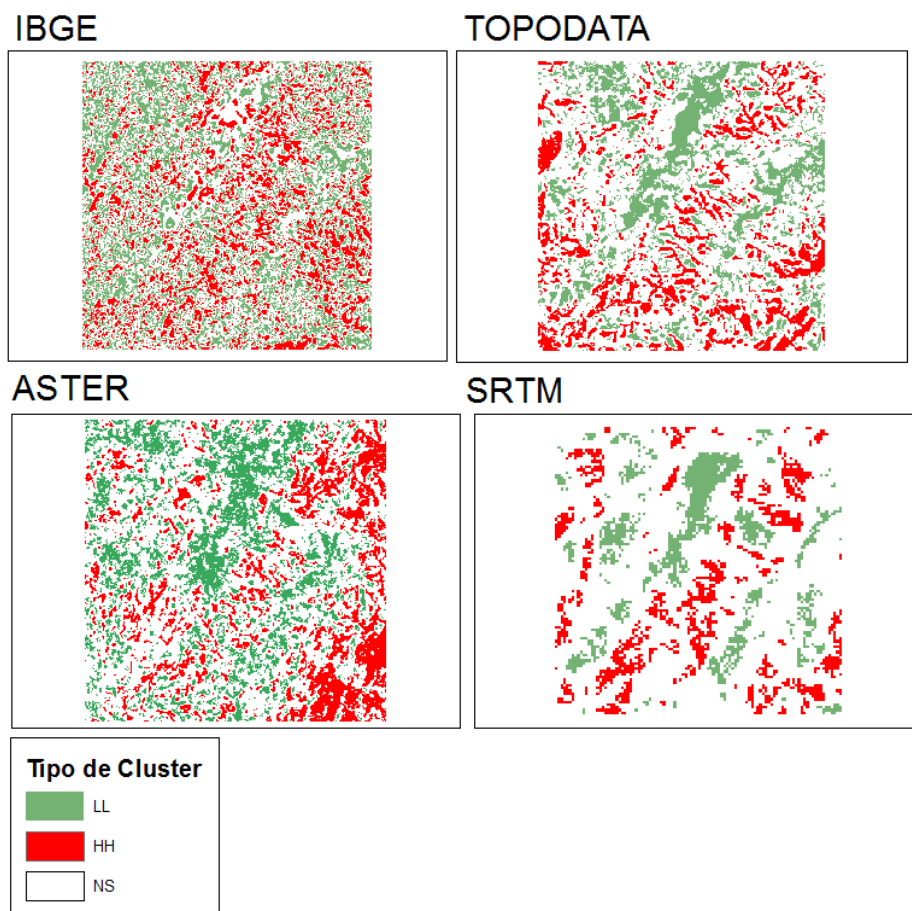


Figura 27 - Clusters estatisticamente significativos pela análise de agrupamento, índice I local de Moran. Verde: Low-Low; Vermelho: High-High, Vazio: não significativo. ASTER; IBGE; SRTM; TOPODATA.

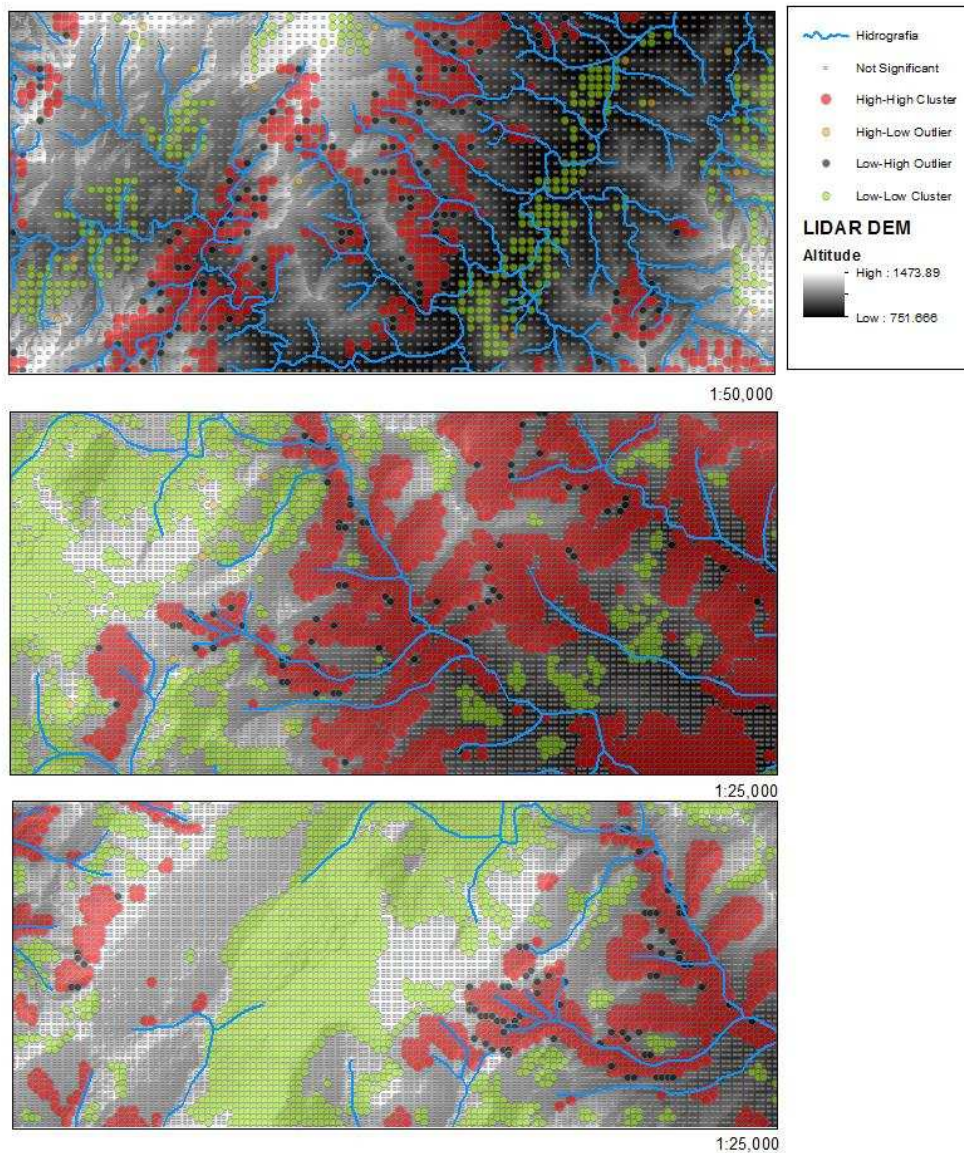


Figura 28 - Padrão da distribuição de clusters em detalhe. Agrupamentos de valores altos de erros são comumente associados às regiões próximas da rede de drenagem onde há maior complexidade do terreno.

Quando há correlação entre o erro de estimativa e atributos do terreno, é possível modelar a distribuição espacial dos erros. Erdogan (2010) testou os métodos de regressão geométrica ponderada e regressão por quadrados mínimos, e encontrou melhores resultados com o primeiro. O autor argumenta que o padrão espacial agrupado dos erros de estimativa, impossibilitou o delineamento de uma regressão por quadrados mínimos, uma vez que a não estacionariedade do fenômeno não permite o ajuste de uma regressão em nível local.

Conforme o discutido, a distribuição dos erros de estimativa nos MDEs é fortemente agrupada no espaço geográfico. Isto sugere que os mesmos podem estar associados às características do relevo em micro-escala, como a textura, ou em macro-escala, como as características de uma feição geomorfológica. Costa et al.

(2010) avaliaram a precisão do MDE SRTM em relação as classes de vegetação. Obtiveram valores de RMSE variando entre 5,1m, na vegetação menos densa e 20,6m, na vegetação mais densa. Mas, nem sempre a distribuição dos erros de estimativa apresenta correlações significativas com atributos do terreno, como mostra Holmes et al. (2000). Nesses casos, não se torna possível a modelagem da predição de erros de estimativa.

4. Conclusões

Os resultados mostram a importância do tamanho amostral na validação dos MDEs. Conforme o apresentado, um número baixo de pontos de checagem pode levar o analista a conclusões equivocadas a respeito da precisão dos modelos digitais de elevação avaliados. Apesar de a abordagem ser essencialmente teórica, uma vez que em campo muitas vezes a coleta de um grande número de pontos é inexecutável, abre espaço para um tema pouco debatido no âmbito da validação dos modelos digitais de elevação.

A validação permite definir um ranking dos MDEs em termos de precisão, dada pelos índices RMSE e EM. Em ordem decrescente de precisão altimétrica, temos: IBGE, SRTM, ASTER e Topodata. Na área de validação, uma densidade amostral de 5,5 pontos/km² foi adequada para validar os MDEs IBGE e ASTER. Para Topodata e SRTM, seria preciso um número maior de pontos.

O melhor Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) foi alcançado pelo MDE produzido com os dados do IBGE: Classe B na escala 1:75.000. O MDE SRTM alcançou Classe A na escala 1:250.000, sendo o pior resultado entre os MDEs avaliados.

Há maiores erros de estimativa na medida a declividade do terreno aumenta, sendo que há diferença significativa entre as médias obtidas nas cinco classes de relevo presentes na área. Os MDEs mostraram desempenhos distintos quanto ao aumento da declividade do terreno, o que poderíamos chamar de uma maior ou menor 'sensibilidade' dos mesmos ao aumento da variabilidade local dos dados, dada pela declividade. O modelo mais influenciado pelo aumento da declividade foi o MDE Topodata e o menos influenciado o MDE ASTER. Os MDEs IBGE e SRTM apresentaram comportamento semelhante. O MDE IBGE foi o mais preciso dentre os testados, independente da declividade do terreno.

Quanto aos modelos digitais de declividade, fica claro que o tamanho de célula do MDE utilizado para produzi-lo é um fator limitante da capacidade dos mesmos de representar fidedignamente os gradientes presentes na paisagem. Constatou-se que, na medida em que aumentamos o tamanho de célula desses modelos, a

correlação com o mundo real decresce linearmente. Isso ocorre por dois motivos principais: a perda de valores extremos e a concentração de valores no centro da distribuição, levando conseqüentemente a uma redução do valor médio.

Os resultados da análise geoestatística apontam forte agrupamento dos erros de estimativa em todos os modelos digitais de elevação avaliados. Os erros de estimativa são associados com a orientação das feições geomorfológicas e com a textura do terreno.

Ainda que o uso dos dados IBGE, na escala 1:50.000, na prática seja mais complicado, pois muitas vezes é necessário cotar manualmente as curvas de nível vetorizadas e unir cartas adjacentes por edição, representam a base de dados topográficos gratuitos mais confiáveis no Brasil, uma vez que o MDE gerado a partir desses dados apresentou melhores resultados em todos os aspectos avaliados.

Capítulo 3

Precisão altimétrica de modelos digitais de elevação (MDEs) produzidos por interpoladores

RESUMO – Nos países em desenvolvimento, a escassez de dados altimétricos em escalas apropriadas é uma realidade nos dias atuais. Diante dessa problemática, muitos pesquisadores e usuários de modelos digitais de elevação (MDEs) lançam mão de uma técnica bastante controversa, mas que muitas vezes consiste na única opção para análise e renderização em maior detalhamento. A interpolação de modelos digitais de elevação para resoluções mais refinadas foi avaliada no presente trabalho, onde os interpoladores Krigagem Ordinária, Inverso do Quadrado da Distância, Spline e Topo to Raster, disponíveis no sistema ArcGIS 10.2, foram utilizados para produzir MDEs com tamanhos de células menores do que as do modelo original. Foram utilizados dados topográficos do IBGE (1:50.000), ASTER GDEM, SRTM e Topodata. Avaliou-se também o RMSE de MDEs produzidos por interpolação de pontos extraídos das curvas de nível do IBGE, em relação à densidade amostral utilizada. Os resultados mostram que a interpolação dos dados para resoluções mais refinadas não proporciona melhoria significativa na qualidade dos MDEs. De fato, resultados piores do que os MDEs originais foram encontrados, além da expressão de artefatos provenientes dos interpoladores. O interpolador Topo to Raster foi o mais adequado para produzir MDEs com pontos extraídos de curvas de nível, onde se verificou que com equidistâncias inferiores a 10 metros não há diferença significativa entre os métodos de interpolação, quanto ao RMSE. Todavia, a melhor consistência hidrológica e qualidade visual dos modelos produzidos por esse interpolador não foi alcançada pelos demais, onde se observou problemas tanto em condições de baixa quanto de alta densidade amostral. O método da Krigagem Ordinária apresentou os piores resultados e se mostrou mais influenciado pelo tamanho amostral utilizado, sobretudo quando se utilizou a krigagem automática (sem modelagem do semivariograma). A modelagem manual do semivariograma na krigagem é decisiva na qualidade da interpolação.

Palavras-chave: MDE, Interpolação, Refinamento

1. Introdução

Os interpoladores espaciais são utilizados em uma série de finalidades nas geociências (Gemmer et al.(2004); Page et al. (2002); Motomiya et al. (2006); Carvalho (2001)), quando, a partir de uma base limitada e pontual de dados, é necessário criar um modelo contínuo para toda a área de estudo. Mais especificamente no caso dos modelos digitais de elevação, os interpoladores podem ser utilizados tanto para regularizar uma grade de pontos irregulares quanto para refinar grades regulares.

Há duas categorias de métodos de interpolação. Os métodos globais procuram considerar todos os valores amostrados, para a estimação de um ponto não amostrado. Os métodos locais são aplicáveis em porções da área mapeada. Isto é, são considerados os valores dos pontos adjacentes numa distância pré-estabelecida (Landim, 2003).

A escolha do método a ser aplicado depende da forma de obtenção do MDE, tipo de grade, características da topografia e finalidade da interpolação (Florinsky, 2011). Aparentemente não há um único interpolador que seja a melhor opção para quaisquer situações (Holmes, 2010), haja vista a divergência de resultados em estudos comparando métodos de interpolação. Testes envolvendo interpoladores são constantemente publicados e a percepção geral é de que as condições topográficas juntamente as características do MDE são dois fatores que podem determinar a escolha do interpolador a ser usado.

Rees (2000) aponta que a precisão alcançada no processo de interpolação é dependente da dimensão fractal da superfície, dada, por exemplo, pela dimensão de Hausdorff (D_H) (Arena-Ríos, 2012), ou pelo desvio padrão entre altitudes de células adjacentes no MDE original. Isto é, regiões de textura mais rugosa tendem a produzir interpolações menos precisas. Chaplot et al. (2006) observaram que a influência do interpolador nos MDEs criados é pequena, quando a densidade de dados é alta e que os melhores desempenhos para krigagem foram registrados em condições onde a estrutura espacial dos dados era forte, isto é, com uma continuidade ao longo do espaço, permitindo uma modelagem mais adequada do fenômeno.

Isaaks & Srivastava (1989) sugerem que um método de estimação deve satisfazer aos seguintes critérios: a distribuição das estimativas deve ser similar a dos valores e a distribuição dos erros das estimativas deve apresentar-se simétrica em torno do centro zero e apresentar pouca variabilidade. Para isto, é necessário que os parâmetros estatísticos das estimativas e dos valores verdadeiros sejam

similares. O gráfico q-q plot, construído com os valores estimados, deve ser similar àquele com os valores verdadeiros. Grandes discrepâncias podem indicar problemas no processo de estimação. Espera-se em um método que as superestimativas estejam em equilíbrio com as subestimativas. Em outras palavras, o método não deve apresentar tendências nem para superestimar, nem para subestimar, resultando numa média dos erros igual ou próxima de zero. Um bom método de estimação deve apresentar um gráfico de dispersão das estimativas versus valores verdadeiros próximo da reta que passa pela origem, isto é, a reta $V_{real} = V_{estimado}$. Esta proximidade pode ser resumida pelo coeficiente de correlação entre os valores estimados e observados.

Florinsky (2002) apresentou uma nova interpretação de três classes de erros nos MDEs, os quais podem ser a origem de diferentes artefatos nos mapas criados: a) erros de interpolação causados pelo fenômeno de Gibbs (cuja existência enquanto fonte de erros nos MDEs só foi elucidada recentemente); b) erros na derivação de MDEs a partir de MDS com resolução aprimorada, dada pelo aumento de ruídos após a diferenciação do MDS; e c) erros no MDE causados pelo deslocamento da grade.

O fenômeno de Gibbs é um comportamento específico de algumas funções, manifestada como desvios próximos a áreas descontínuas (Jerri, 1998). No caso dos MDEs, seriam áreas com variação abrupta na superfície, como regiões escarpadas, terraços artificiais, picos e aquelas onde há presença de erros sistemáticos ou aleatórios mais pronunciados. Após a interpolação, os erros causados pelo fenômeno de Gibbs afloram próximos a estas discontinuidades, comumente na forma de uma corcova ao longo dos limites da escarpa e de uma vala ao longo dos pés da encosta (Figura 1). Esses artefatos podem prejudicar fortemente qualquer modelagem hidrológica, por exemplo. Isto poderia ser evitado utilizando interpoladores que não gerem esse fenômeno ou mesmo tratando esses erros através de filtros após a interpolação.

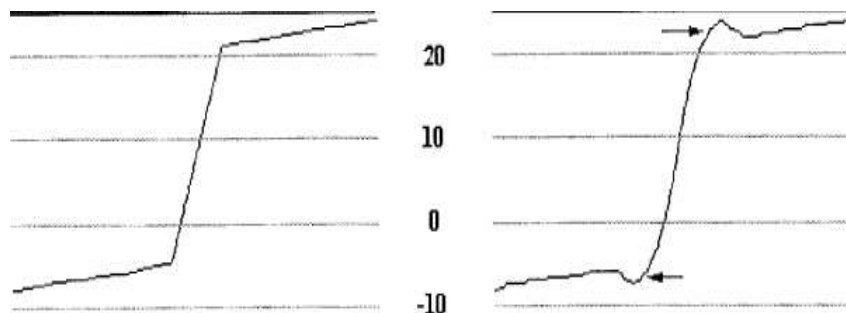


Figura 1 – Representação do fenômeno de Gibbs em um perfil topográfico de uma superfície sintética. Artefatos criados por interpolação com suavização indicados pela seta. Fonte: adaptado de Florinsky (2002)

Embora a interpolação de modelos digitais de elevação para resoluções mais refinadas seja uma prática comum, alguns autores questionam sua validade. Para eles, a interpolação de um MDE não provê um meio de aumentar a resolução do mesmo, isto é, seria impossível reconstruir feições topográficas com dimensões inferiores à resolução do MDE original. Obviamente, a resolução nominal dos MDEs poderia ser melhorada pela interpolação, todavia esse procedimento não poderia aprimorar verdadeiramente a resolução espacial destes (Horn, 1981; Sasowsky et al., 1992). Assim, as feições do relevo criadas por interpolação - com dimensões menores do que a resolução do MDE - seria somente um ruído de alta frequência, causado por propriedades do interpolador tratando-se, portanto, de falsas feições do relevo.

De fato, a prática de interpolação de MDEs para aumento de resolução é um artifício técnico para lidar com a necessidade urgente de dados topográficos de alta resolução em grande escala no Brasil e no mundo, sobretudo nos países em desenvolvimento.

Entre os diversos interpoladores existentes, há quatro tipos que são largamente utilizados para produção de modelos digitais de elevação, nomeadamente: função de curvatura mínima (Spline), inverso ponderado da distância (IDW), krigagem e o algoritmo TOPOGRID, implementado no ArcGIS como Topo to Raster a partir da versão 9. As características de cada um foram resumidas na Tabela 1:

Tabela 1 - Características dos métodos de interpolação utilizados. Fontes: ESRI (2013); Isaaks e Srivastava (1989).

Método	Tipo	Exato/Inexato	Indicações/Vantagens	Restrições/Desvantagens
Spline	Determinístico	Exato	Grande volume de dados e pouca variação espacial dos mesmos; produção de superfícies suavizadas.	Situações com alta heterocedasticidade; predição dos erros das estimativa não é apresentado; não aceita dados colineares
IDW	Determinístico	Exato	Baixo custo computacional; flexível	Efeito “mira” (bulls eye); predição dos erros não é apresentado; sensível a clusters e outliers
Krigagem	Estatístico	Exato	Permite avaliar a autocorrelação espacial dos dados; produz predição dos erros de estimativa; não é influenciado por clusters.	Alto custo computacional; necessidade de ajuste do semivariograma;

Topo to Raster	Determinístico/ Hidrológico	Exato	Processa curvas de nível; permite diferentes tipos de dados de entrada; gera MDEs com consistência hidrológica.	Alto custo computacional; não suporta grande volume de dados
-----------------------	--------------------------------	-------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------

A função de curvatura mínima (ou spline) tem seu nome derivado de uma ferramenta flexível de desenho técnico, e é um método de interpolação muito aceito e utilizado atualmente. Distinto de outros métodos de interpolações polinomiais, não utiliza apenas um polinômio de grande ordem para interpolação de todo o conjunto de dados, mas sim divide a série de dados em subconjuntos e utiliza polinômios de pequenas ordens para cada um deles. A soma ou junção deles é que forma a interpolação sobre todo o domínio. O grau de polinômio mais utilizado é 3. A função Spline preserva a posição original dos pontos e, portanto, a superfície suavizada produzida passa exatamente sobre eles. O aspecto positivo desse método de interpolação é a produção de superfícies suavizadas, apropriadas para fenômenos que apresentam variações constantes ao longo do espaço. Por outro lado, está sujeito ao fenômeno de Gibbs, abordado anteriormente.

O inverso ponderado da distância pode ser classificado tanto como um interpolador exato como suavizante, onde os pesos dos dados são avaliados durante o processo de interpolação, tal que a influência de cada ponto é inversamente proporcional à distância do nó da malha. O fator peso pode ser pré-determinado pelo usuário, sendo que quanto maior o valor escolhido, menor será a influência dos pontos mais distantes do nó. Inversamente, quanto menor for o peso, maior o efeito de pontos distantes sobre toda a malha. Uma particularidade negativa deste método é a geração de efeito mira, ou *'bull's eye'* em inglês, ao redor dos pontos observados (Mazzini & Schettini, 2009; Alves & Vecchia, 2011). Esse método simples e clássico, é recomendado para regiões com alta densidade de amostras (Deus et al., 2010), tendo como pontos positivos sua rapidez e baixo requerimento em termos de custo computacional. Usualmente é utilizado com o expoente dois com bons resultados, por esse motivo recebe a denominação de inverso do quadrado da distância (Watson e Philip, 1985; Mello et al., 2003).

O interpolador krigagem é baseado numa função contínua, que explica o comportamento de uma variável nas distintas direções de um espaço geográfico considerando uma distância estatística, e não somente a distância geográfica (Isaaks & Srivastava, 1989). Esse interpolador associa a variabilidade da estimação, com base na distância que existe entre um par de pontos, pelo uso de

uma função de covariância ou variância, o qual permite verificar o nível de similitude que existe entre estes, à medida que se afastam (Gallardo, 2006). A Krigagem geoestatística é interessante, porque produz estimativas sem tendências e permite o cálculo do erro gerado na interpolação, que por sua vez é diretamente proporcional à distância entre o ponto interpolado e a observação (Oliver & Webster, 1990). O método da krigagem reproduz os valores observados. Em outras palavras, para um ponto observado V_i utilizado na interpolação, o valor estimado V_k será igual, isto é, $V_i = V_k$.

O algoritmo Topo to Raster (originalmente TOPOGRID) foi baseado nos trabalhos desenvolvidos no programa ANUDEM por Hutchinson (1988, 1989). Nogueira e Amaral (2009) explicitam que essa técnica de interpolação foi desenhada com o objetivo específico de converter dados vetoriais em modelos hidrológicos de elevação de terreno exatos. O método utiliza a eficiência computacional da interpolação local, como ponderação do inverso da distância, sem perder a continuidade superficial dos métodos globais de interpolação. A principal diferença desse método de interpolação, em relação àqueles previamente abordados, é que ele foi desenvolvido especificamente para produção de modelos digitais de elevação e, para isso, considera o maior fator de modelagem do relevo terrestre: a água. O programa impõe uma condição global de drenagem por meio de um algoritmo que automaticamente remove depressões espúrias. Os dados de entrada podem incluir elevações pontuais, curvas de nível, redes de drenagem, linhas de ruptura do relevo, polígonos de corpos d'água, entre outros. Como resultado, é produzido um modelo digital de elevação de grade regular com boa consistência hidrológica.

Diante do exposto, o presente artigo objetiva validar os modelos digitais de elevação produzidos por interpolação dos modelos originais. Assim, a partir da resolução nominal dos MDEs, produziram-se novos modelos com menores tamanhos de célula, utilizando-se quatro interpoladores e quatro níveis de interpolação. Esses, por sua vez, foram validados quanto ao RMSE

2. Materiais e Métodos

2.1 Bases de dados

Foram utilizados dados topográficos gratuitos e com grande cobertura do território brasileiro. Dentre eles, dois são modelos digitais de superfície produzidos por diferentes fontes (SRTM e ASTER GDEM) e uma é proveniente de levantamento estereofotogramétrico topográfico regular (IBGE), que por sua vez foi utilizada na forma de um modelo digital de elevação.

Os dados do sistema LIDAR (Light Detection and Rangin) foram utilizados como base de referência neste trabalho. O levantamento com sensor aerotransportado foi feito para a companhia Vale S/A para fins de prospecção de minério e cobre parte da área de estudo. O equipamento utilizado foi o ALS50, com abertura de 70° e frequência de até 150 kHz. Para atingir a quantidade mínima de 4 pontos/m² o perfilamento a laser foi realizado com altitudes de vôo entre 3040 a 2340 metros. Os pontos foram transformados em um MDE com resolução de 2x2 m através da média da altitude dos pontos incluídos na área da célula (pixel).

O modelo digital de elevação do SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) foi produzido através de uma parceria entre a Agência Nacional de Inteligência Geoespacial (NGA) e a Agência Espacial Norte-Americana (NASA), com o objetivo de coletar dados de elevação de todo o globo, entre as latitudes 60° N e 57°S. Numa missão com 11 dias de duração, entre 11 e 22 de fevereiro de 2000 a bordo do ônibus espacial Endeavour, coletou os dados através de interferometria por radar (InSAR), fornecendo informações sobre a elevação da superfície em resolução de 1 segundo de arco (aproximadamente 30x30 m) para o território norte-americano e 3 segundos de arco (~90x90 m) para o restante do mundo. Os dados são disponibilizados na internet pelo serviço geológico norte-americano (USGS) no site <http://srtm.usgs.gov/index.php>. Para a resolução disponível no território brasileiro (~90x90 m) a literatura cita diferentes escalas de trabalho, baseadas no Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC), desde 1:30.000 até 1:250.000 (Higa et al, 2006; Souza & Loch, 2006 apud Martins, 2010) para Classe A. Essa variação está relacionada com particularidades dos terrenos avaliados, bem como a metodologia de validação utilizada.

A base de dados do sensor ASTER GDEM (Advanced Space borne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model) foi produzida conjuntamente pelo governo japonês e a NASA. Esse sensor foi lançado a bordo do satélite Terra em dezembro de 1999. Esta missão cobriu toda superfície terrestre entre as latitudes 83°N e 83°S, produzindo um MDE com resolução de 30m (aprox. 1 arc.seg-1) através de fotogrametria estereoscópica digital. A segunda versão deste MDE foi lançada em outubro de 2011, onde uma série de inconsistências e erros sistemáticos presentes na primeira versão foi corrigida. Nos dias atuais sua precisão vem sendo avaliada pela comunidade acadêmica. Houve um significativo ganho na qualidade deste produto desde a primeira versão, onde a precisão vertical era de 20m, para a segunda versão onde a precisão vertical é de 8,86m, a 95% de confiabilidade, de acordo com o ASTER GDEM V2 Validation Report (disponível em: <http://www.jspacesystems.or.jp>). Em uma região

montanhosa do Estado do Rio de Janeiro, Yoshikawa et al. (2011) encontraram um valor de 9,88m para o RMSE, tendo como referência curvas de nível na escala de 1:10.000.

As curvas de nível foram produzidas pela Diretoria de Geodésia e Cartografia do Instituto Nacional de Geografia e Estatística (IBGE) nos anos 1970 a partir de um levantamento estereofotogramétrico topográfico regular. Para a região de estudo, as cartas estão na escala de 1:50.000 com equidistância vertical de 20m. Foram utilizadas as folhas Acuruí (SF-23-X-A-III-2), Rio Acima (SF-23-X-A-III-3), Belo Horizonte (SE-23-Z-C-VI-3) e Caeté (SE-23-Z-C-VI-3). A união das quatro cartas foi feita através de edição manual no ArcMAP 10.1. A partir das curvas de nível e dos pontos cotados foi produzido um MDE com 10m de resolução espacial através do interpolador Topo To Raster não condicionado hidrologicamente.

2.2 Interpolação e validação dos dados

Os dados de elevação provenientes dos MDEs foram submetidos aos interpoladores com o objetivo de checar a possibilidade de um refinamento dos modelos, criando mapas com maior resolução. Foram utilizados os interpoladores: Topo to Raster (ANUDEM 5.3), krigagem ordinária, inverso ponderado da distância e função de base radial (spline). Para tal, os arquivos matriciais foram convertidos em pontos e esses foram usados como dados de entrada nos interpoladores. No caso específico da base de dados do IBGE, as curvas de nível foram transformadas em pontos com 10m de equidistância horizontal e unidas aos pontos cotados.

Foram criados novos MDEs, interpolados com melhor resolução nominal a partir dos originais, em frações decrescentes relativas à resolução dos mesmos: 0,75; 0,50; 0,25 e 0,10 vezes o tamanho de célula do MDE original.

Antes de submeter os dados ao processamento, foi realizada uma análise exploratória para verificar a distribuição dos dados e a presença e posição espacial de outliers ou valores extremos, destoantes da distribuição normal. Valores muito discrepantes são fontes potenciais de erros grosseiros em métodos de estimação. As estimativas foram qualificadas através de validação, utilizando os dados do sistema LIDAR como verdade de campo.

No caso da krigagem ordinária, o semivariograma foi modelado na extensão Geostatistical Wizard do ArcMap 10.1 de forma manual. O modelo Gaussiano foi escolhido por se mostrar mais adequado ao fenômeno e os parâmetros alcance, patamar e efeito pepita foram obtidos para cada conjunto de

dados e aplicado no interpolador para execução automática do processo, bem como o tamanho das lags. Os parâmetros utilizados foram definidos para cada base de dados (Tabela 2). Nenhuma transformação ou remoção de tendências foi realizada.

Tabela 2 - Parâmetros utilizados na modelagem do semivariograma isotrópico, para cada base de dados.

Database	Tamanho das lags (m)	Número de lags	Alcance (m)	Patamar	Efeito Pepita
Aster	30	12	360	1813,99	1,81
Srtm	91	9	819	4885,83	102,78
IBGE	50	15	734,17	5207,18	178,67

No interpolador Spline, utilizou-se o tipo regularizado e 12 pontos para interpolação local. No interpolador inverso da distância ponderada, utilizou-se peso 2 e 12 pontos para interpolação local. As configurações do interpolador Topo to Raster foram deixadas na forma padrão e não foi aplicado o aprofundamento da drenagem (condicionamento hidrológico).

A validação dos modelos gerados por interpolação foi feita com base em uma amostragem contendo 500 pontos de checagem, de onde se calculou o RMSE e o EM dos mesmos.

2.3 Validação dos MDEs construídos a partir de pontos extraídos das curvas de nível do IBGE.

Os dados topográficos provenientes do IBGE, são disponibilizados na forma de curvas de nível e, para serem transformados em Modelos Digitais de Elevação, é necessária sua interpolação. Normalmente, utiliza-se o interpolador Topo to Raster para esta tarefa, pela razão de que este algoritmo é o único com habilidade em interpolar dados dessa natureza. Todavia, há também a possibilidade de transformar as linhas (curvas de nível) em pontos e utilizar outros interpoladores clássicos (krigagem, spline, inverso do quadrado da distância, etc), que por sua vez trabalham somente com dados nesse tipo de estrutura.

Há, neste sentido, a importância da densidade amostral utilizada para realizar a interpolação. Considerando que, teoricamente, infinitos pontos formam uma linha, quantos serão necessários para que o relevo seja fidedignamente modelado sem que o esforço computacional torne esta tarefa demasiado lenta? Nessa situação o tempo de processamento pode durar de poucos minutos a algumas horas, dependendo do volume de dados utilizados. Por isto justifica-se a otimização do processamento, a fim de alcançar a melhor modelagem do relevo no menor tempo possível, ao eliminar informações redundantes.

Para responder a esta questão, foram criados Modelos Digitais de Elevação a partir de pontos extraídos das curvas de nível, em diferentes densidades amostrais variando-se a distância entre cada ponto amostrado. A partir das curvas de nível foram geradas 12 bases de dados, onde cada uma possuía diferente espaçamento entre os pontos, os quais sejam: 4, 6, 8, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 e 90 metros. Esses pontos foram interpolados nos algoritmos krigagem ordinária (com modelagem automática do semivariograma), inverso do quadrado da distância, spline e Topo To Raster. 45 pontos cotados dentro da área de validação, também disponibilizados pelo IBGE foram usados na interpolação. Os MDEs, produzidos com 10 metros de resolução espacial, foram avaliados quanto ao RMSE.

3. Resultados e discussão

3.1 Validação de MDEs criados por interpolação

Os MDEs originais (IBGE, ASTER e SRTM) foram submetidos à interpolação, de onde se criaram novos modelos com menor tamanho de célula. Foram testados quatro interpoladores (krigagem, spline, IDW e Topo to Raster) e quatro níveis de interpolação, os quais sejam: 75, 50, 25 e 10% da resolução original dos modelos. Desta forma, avaliou-se a possibilidade de obtenção de MDEs mais precisos a partir dos dados originais. A precisão dos modelos foi mensurada pelo RMSE e EM (Tabela 3)

Os resultados foram tabulados por tipo de base de dados, nível de interpolação e tipo de interpolador, para serem submetidos à análise de variância com dois fatores, ambos com quatro níveis. Os resultados da ANOVA são apresentados na Tabela 4.

Constatou-se que o tipo de interpolador utilizado, bem como o nível de interpolação, não promoveu mudança significativa na precisão dos modelos digitais de elevação, dada pelo RMSE. Portanto, para o conjunto de dados e a área estudada nessa pesquisa, não se justifica o uso de interpoladores com o intuito de melhorar a resolução dos MDEs.

Tabela 3 – Valores de RMSE e EM (em metros) dos modelos digitais de elevação submetidos à quatro interpoladores e quatro níveis de interpolação.

Dados	Resolução	% da resolução original	Krigagem Ordinária		Spline		IDW		Topo to Raster	
			RMSE	EM	RMSE	EM	RMSE	EM	RMSE	EM
ASTER	22.5	75	14,20	10,21	14,26	10,20	14,37	10,28	14,25	10,21
	15	50	14,18	10,20	14,25	10,16	14,32	10,18	14,22	10,11
	7.5	25	14,18	10,19	14,28	10,17	14,33	10,17	14,22	10,18

	3	10	14,16	10,20	14,29	10,17	14,33	10,16	14,25	10,18
SRTM	67.5	75	15,54	5,90	14,96	5,86	16,33	6,00	16,15	6,05
	45	50	15,28	5,88	14,70	5,86	16,16	5,88	15,80	5,68
	22.5	25	15,14	5,85	14,79	5,85	16,00	5,77	15,19	5,68
	9	10	15,10	5,84	14,83	5,85	15,99	5,74	15,16	5,75
IBGE	7.5	75	10,75	-1,00	11,33	-1,17	11,00	-0,88	10,58	-1,05
	5	50	10,74	-1,03	11,43	-1,14	11,00	-0,87	10,57	-1,05
	2.5	25	10,76	-1,03	11,39	-1,14	11,01	-0,87	10,58	-1,06
	1	10	10,76	-0,95	11,47	-1,16	11,01	-0,86	10,57	-1,07

Tabela 4 - Análise de variância para o erro médio quadrático (RMSE), com dois fatores: tipo de interpolador e nível de interpolação.

Tratamentos	GL	SQ	QM	F	p-valor ¹
Nível de interpolação	3	0,19	0,062	0,014	0,998 ^{ns}
Interpolador	3	1,28	0,426	0,097	0,961 ^{ns}
Resíduos	41	179,56	4,379		

1 – ns: não significativo

As interpolações de MDEs para refinamento geram resultados até piores do que o modelo original. Como também observou Souza (2006), a qual sugere a interpolação bilinear para melhorar a qualidade visual dos dados.

Pires et al. (2005) compararam os resultados dos interpoladores IDW, SPLINE e Topo to Raster, levando em conta a consistência hidrológica dos produtos gerados e verificaram melhor desempenho do algoritmo Topo to Raster. Todavia, no presente trabalho, a consistência hidrológica não foi, diretamente, tema de discussão, por fugir ao tema do presente estudo.

Embora Krigagem seja o melhor estimador não viesado, Erdogan (2010) observou que esse método produziu os piores resultados em termos de agrupamento espacial de erros de estimativa.

Conclui-se que a produção de MDEs com resolução mais alta por interpolação dos dados originais não melhora a sua precisão, portanto essa prática somente seria condizente para fins de representação gráfica. Uma vez que não há melhora significativa nos modelos, sugere-se que sejam utilizados os dados originais, a fim de evitar a produção de ruídos e anomalias pertinentes aos algoritmos de interpolação.

3.2 Validação de MDEs construídos a partir de pontos extraídos de curvas de nível.

Uma análise a parte foi feita para os dados do IBGE, para verificar a influência da densidade amostral na precisão dos MDEs criados por interpolação.

As curvas de nível cotadas foram transformadas em pontos, com equidistâncias de 2, 4, 6, 8, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 e 90m. Esses pontos foram submetidos aos interpoladores inverso do quadrado da distância, krigagem ordinária, spline e Topo to Raster e foi calculado o RMSE para cada um dos MDEs produzidos, todos com 10 metros de resolução.

Para verificar a importância da modelagem manual do semivariograma, os dados foram interpolados por krigagem de duas maneiras: de forma automática, apenas alimentando o interpolador com os pontos na extensão 3D Analyst e, também, através da modelagem manual do semivariograma, individualmente para cada conjunto de dados a ser interpolado. O ajuste do semivariograma foi feito na extensão Geostatistical Analyst, onde se buscou modelar o fenômeno a nível local, de forma a não considerar o padrão anisotrópico, observado em maior escala. O modelo escolhido foi o Gaussiano, por seu melhor ajuste para o fenômeno em questão.

Os resultados mostram que há duas situações problemáticas, quando utilizamos pontos extraídos de curvas de nível para interpolação. De um lado, nota-se a grande dificuldade dos interpoladores para lidar com uma baixa densidade de pontos, resultando numa forte suavização do relevo nos MDEs criados pelos interpoladores spline e krigagem ordinária. Para o mesmo caso, o interpolador inverso do quadrado da distância apresenta os artefatos conhecidos como efeito “mira” (Figura 2), culminando na formação de pequenas “ilhas” e falsas elevações no MDE.

Do contrário, quando um grande número de pontos foi utilizado, reduzindo a distância entre eles, observou-se a formação de falsos "terraços", formados pela super amostragem de pontos com a mesma altitude ao longo das curvas de nível. Uma vez que os dados a serem interpolados se tornam mais próximos, mais pontos colineares são utilizados para calcular a estimativa. Estes "terraços" são artefatos gerados pelos algoritmos de interpolação e causam inconsistência dos modelos, podendo causar problemas em análises de cunho hidrológico e no mapeamento de APPs em topos de morros. Esse efeito foi observado nos resultados obtidos com interpolação por krigagem, inverso do quadrado da distância e spline. Os problemas apresentados para situações de baixa e alta densidade amostral não foram observados nos MDEs produzidos com o interpolador Topo to Raster (Figura 3) que se mostrou, visualmente, mais eficiente na interpolação dos dados.

Medeiros et al. (2009) submeteram os dados do IBGE (curvas de nível na escala 1:100.000) à interpolação e também verificaram melhor desempenho do

interpolador Topo to Raster em relação ao IDW, embora os autores não especifiquem o tamanho da malha de pontos usadas no segundo interpolador.

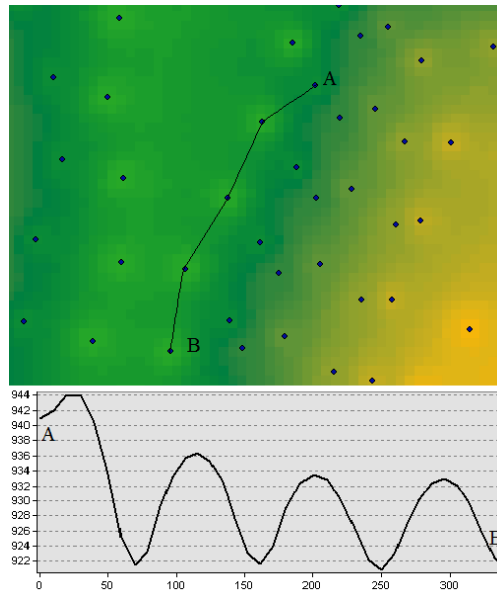


Figura 2 - Visualização do efeito “mira” produzido pelo interpolador inverso do quadrado da distância com baixa densidade de pontos (eqüidistância horizontal 90m nas cotas de nível). Abaixo, o perfil topográfico traçado do ponto A ao ponto B mostra os artefatos produzidos pela interpolação.

Junto à problemática apresentada, soma-se o fato de que o uso de grandes volumes de dados aumenta consideravelmente o tempo de processamento, nomeadamente para os interpoladores Topo to Raster e krigagem ordinária. Justifica-se, portanto, definir uma densidade amostral que seja suficiente para modelar corretamente o relevo, sem que haja produção de artefatos decorrentes do número insuficiente ou exagerado de pontos usados na interpolação.

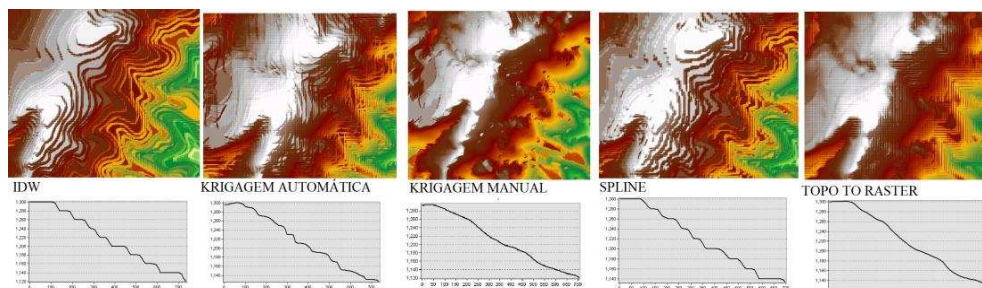


Figura 3 - Falsos “terraços” produzidos pelos algoritmos IDW, krigagem (automática) e spline na interpolação de dados com alta densidade. O efeito não é observado no MDE interpolado por Topo to Raster e na krigagem com ajuste manual do semivariograma.

Quando os mapas produzidos por krigagem manual e da krigagem automática são comparados, percebe-se que, nos primeiros, não há expressão de artefatos como na segunda ocasião. Portanto, a modelagem manual do semivariograma é cogente para interpolação de dados de altitude, uma vez que o

melhor ajuste do modelo na situação específica reduz a expressão de artefatos observados na interpolação automática.

Além disso, ressalta-se a importância da modelagem manual do semivariograma para determinação de parâmetros condizentes com o objeto de estudo. Há uma forte influência do tamanho das lags na modelagem anisotrópica do fenômeno, em razão do efeito de escala (Figura 4). Ao considerarmos distâncias curtas para o pareamento, com 12 lags de 30 metros, estamos modelando o fenômeno mais localmente. No caso do conjunto de dados da presente análise, em menores escalas o comportamento dos dados é claramente isotrópico. Por outro lado, maiores distâncias de pareamento enunciam marcada anisotropia do fenômeno, em grande escala. Aqui, a anisotropia reflete a orientação estrutural do relevo, com feições que se alongam no sentido sudoeste-nordeste (montanhas e rios).

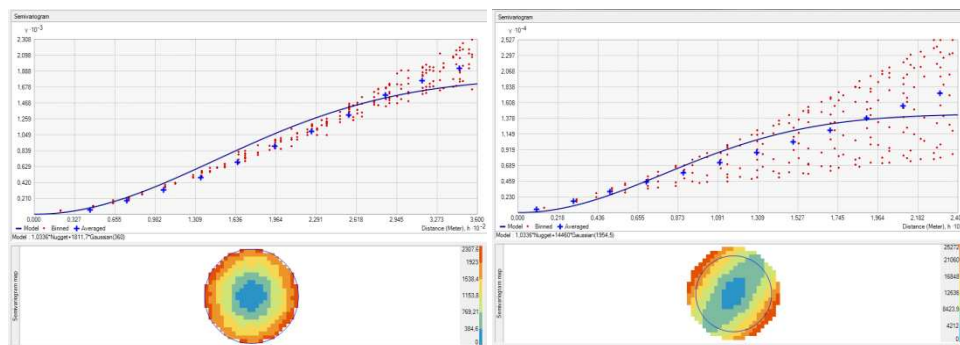


Figura 4 - Exemplo de semivariogramas modelados na krigagem para um mesmo conjunto de dados, representando a influência do tamanho das lags na anisotropia do fenômeno. À esquerda, lags de 30 metros (menor dimensão entre os pontos) e, à direita, lags de 200 metros.

Há notável influência dos interpoladores nos produtos gerados, que foi tão maior, quanto menor a densidade amostral utilizada, o que também foi observado por Chaplot et al. (2006). Os resultados mostram que os algoritmos de interpolação possuem menor potência na medida em que menos dados são usados para interpolação, com exceção do interpolador Topo to Raster, o qual foi capaz de produzir modelos com boa precisão mesmo com baixas densidades amostrais. Em geral, com menos pontos utilizados (bem como seu maior distanciamento), há redução da precisão dos MDEs criados. Apesar da suavização ocasionada pela baixa quantidade de informações fornecidas, este algoritmo conseguiu representar o relevo de forma fidedigna, ainda que com menor detalhamento. Esse interpolador foi o mais adequado para a interpolação de dados altimétricos na forma de pontos, pois produz resultados confiáveis mesmo com menor volume de dados. Para

equidistâncias menores que 10m, não há diferença significativa entre os interpoladores quanto ao RMSE (Figura 5).



Figura 5 - RMSE dos modelos digitais de elevação gerados por interpolação de pontos obtidos das curvas de nível do IBGE em diferentes densidades amostrais, dada pela equidistância entre pontos numa mesma cota.

O valor do RMSE, calculado para os MDEs produzidos pelos dois métodos de krigagem, mostra que a modelagem manual do semivariograma é fundamental para produção de modelos com melhor precisão, sobretudo em ocasiões de baixa densidade amostral. Como visto anteriormente, as análises visuais dos mapas mostram que os MDEs produzidos dessa forma também estão menos sujeitos à expressão de artefatos. Quando se utilizou uma alta densidade de pontos, os resultados dos dois métodos foram semelhantes quanto ao RMSE, diferindo-se tão somente pela aparente consistência hidrológica e qualidade gráfica dos MDEs criados. Porém, ainda que a expressão de artefatos seja menor com a modelagem manual do semivariograma, eles de fato existem. O maior RMSE obtido com o distanciamento dos pontos, na krigagem ordinária, também foi constatado por Erdogan (2009).

Para fins de comparação, o RMSE do MDE com 10m de resolução, construído com os dados IBGE na forma de curvas de nível no interpolador Topo to Raster, na mesma área de estudo, é de 11m. Considerando que o menor RMSE obtido na interpolação dos pontos foi de 10,7m, conclui-se que não há sentido em transformar essas curvas de nível em pontos para interpolação, uma vez que o interpolador Topo to Raster é capaz de criar um modelo mais consistente, com um número menor de operações de geoprocessamento. Além disso, a expressão de

artefatos sugere cautela nessa prática, já que as mesmas podem afetar diretamente análises de cunho hidrológico, por exemplo.

4. Conclusões

A interpolação dos dados, para produção de modelos digitais de elevação com melhores resoluções, não mostrou melhoras significativas nos mesmos. Não houve diferença entre interpoladores ou níveis de interpolação. Dessa forma, conclui-se que, para o conjunto de dados utilizados e o tipo de relevo estudado, não há possibilidade de “melhoria” dos MDEs por interpolação dos mesmos. Portanto, essa ação melhora tão somente a qualidade gráfica dos mapas, não sendo confiáveis para análises formais.

A interpolação de dados de elevação, obtidos de curvas de nível do IBGE, devem ser feitos de forma sensata, visto que há diferentes artefatos criados pelos interpoladores, tanto em situações de alta quanto de baixa densidade amostral. Os interpoladores apresentaram performances diferentes quanto à variação do volume de dados usados (número de pontos), dado pelas diferentes equidistâncias testadas. Os melhores resultados foram obtidos para o interpolador Topo to Raster, o qual apresentou bons desempenhos mesmo com menor volume de dados. Quando uma alta densidade de pontos foi utilizada, não se noticiou uma diferença significativa entre os interpoladores. Recomenda-se evitar o uso da modelagem automática do semivariograma na interpolação de por krigagem, para este tipo de estrutura de dados.

Com exceção do interpolador Topo to Raster, os demais não apresentam bom desempenho com o tipo de estrutura espacial de pontos utilizados, dispostos sobre as curvas de nível. A representação excessiva de valores idênticos de altitude é a causa provável dos artefatos observados.

Capítulo 4

Proposta metodológica em SIG para delimitação de Áreas de Preservação Permanente em topos de morro, segundo a Lei 12.651/2012

RESUMO: O mapeamento das Áreas de Preservação Permanente (APPs) em topos de morros constitui um desafio desde a regulamentação desse instituto pela Resolução 303/02 do CONAMA. Além da dificuldade técnica de interpretação e aplicação da norma, havia a complexa tarefa de traduzir as mesmas para os sistemas de informação geográfica (SIG), através da álgebra de mapas. Para o caso de mapeamentos em campo, sobretudo os de grandes dimensões, o deslocamento, o tempo necessário e a grande dificuldade de acesso à algumas áreas fazem que o custo torne esse procedimento inviável. Justifica-se, por isso, o desenvolvimento de modelos para mapeamento digital automatizado. Esses apresentam a vantagem de eliminar a subjetividade e produzir uma base de dados georreferenciada de forma rápida e com baixo custo. Com a nova definição dos critérios para delimitação das APPs em topos de morros, trazida pela Lei 12.651/2012, o novo Código Florestal, há a necessidade do desenvolvimento de uma metodologia que contemple os parâmetros estabelecidos na lei. A organização desses dados em grandes escalas é importante, por exemplo, para o Cadastro Ambiental Rural (CAR), instituído pelo NCF, que prevê o georreferenciamento de todas as propriedades e de suas áreas protegidas, no Brasil. Diante do exposto, o presente estudo tem como objetivo apresentar, de forma detalhada, um modelo metodológico para delimitação de APPs em topos de morros, segundo o NCF brasileiro. O modelo foi desenvolvido com sucesso no sistema ArcGIS 10.2 e é capaz de delimitar as APPs em qualquer modelo digital de elevação. Há, contudo, necessidade da normatização dos critérios que causam subjetividade na delimitação.

Palavras-chave: APP, mapeamento, topos de morros, novo código florestal, SIG

1. Introdução

O uso dos sistemas de informação geográfica (SIG) na delimitação de Áreas de Preservação Permanente (APPs) e o cruzamento dessas informações com outros mapas temáticos, favoreceram o desenvolvimento de muitos estudos nas últimas décadas, contribuindo para a geração de informações digitais e formação de bancos de dados georreferenciados, que são de grande importância na gestão ambiental para governos e iniciativa privada. Contudo, diferente das demais APPs, as situadas nos topos de morros são de delimitação bastante complexa em campo. O alto custo e a grande demanda de tempo para o mapeamento in loco justificam a elaboração de técnicas de mapeamento digital. Esse, por sua vez, permite a obtenção de dados em grandes escalas e contribui para o planejamento territorial. Por exemplo, Victoria et al. (2008) estimaram que as APPs em topos de morros ocupavam 74.016km² no Estado de Minas Gerais, representando 12,46% do território. A distribuição dessas APPs se concentra majoritariamente nas mesorregiões do Jequitinhonha, Vale do Mucuri, Vale do Rio Doce, Zona da Mata, Sul e Sudoeste de Minas. A produção desse tipo de informação só se torna possível diante das técnicas de geoprocessamento.

A delimitação automática elimina a subjetividade do processo, pois não há interferência do analista (Ribeiro et al., 2005). Dentre as metodologias criadas em ambiente SIG para mapeamento automatizado de APPs em topos de morros, segundo a Resolução CONAMA 303/02, destacam-se as de Oliveira (2002), Hott (2004), Ribeiro et al. (2005), Peluzio et al. (2010), Soares et al. (2011) e Vieira et al. (2011). Todos os trabalhos publicados nesse tema utilizaram modelos digitais de elevação (MDE) ou modelos digitais de superfície (MDS) para delimitar as APPs em topos de morros, por meio de funções hidrológicas dos mais variados sistemas de informação geográfica. Muitas foram as bases de dados utilizadas, destacando-se o SRTM, com resolução de 90m, além de dados provenientes de levantamentos mais específicos, que por sua vez foram convertidos para a representação matricial como MDEs.

Uma primeira aproximação metodológica, desenvolvida para a aplicação do novo Código Florestal, é apresentada em Oliveira & Fernandes Filho (2013), onde se objetivou traduzir as exigências legais em operações de geoprocessamento efetuadas em Modelos Digitais de Elevação (MDEs). Tendo alcançado significativo progresso neste trabalho, surgiram outras questões de maior importância a serem consideradas neste projeto de pesquisa, no sentido de assegurar a viabilidade do uso desta metodologia, no que tange os aspectos

cartográficos e legais, possibilitando seu uso por agentes governamentais e iniciativa privada

Alguns trabalhos atentaram para a importância da escala de mapeamento nos resultados obtidos na delimitação das APPs em topos de morros, indicando que escalas pequenas (menor detalhamento) podem subestimar a área total mapeada (Catelani et al., 2003; Victoria, 2010; Barbarisi et al., 2011), contudo há uma escassez de informações a respeito da qualidade dos mapas gerados em relação à escala e as diferentes bases de dados utilizadas, bem como sua correspondência com a verdade de campo, especialmente quanto ao novo Código Florestal. Os modelos digitais de elevação estão sujeitos a erros e incertezas (Fisher & Tate, 2006), que podem se manifestar na forma de diferentes resultados em termos de áreas mapeadas.

Com base no exposto, justifica-se a necessidade do desenvolvimento de uma metodologia para mapeamento automático das APPs em topos de morros, segundo o artigo 4º, inciso IX do novo Código Florestal.

2. Materiais e métodos

O modelo foi desenvolvido em ambiente de programação Model Builder, do sistema ArcGIS 10.1. Para acolher a demanda crescente de softwares livres, as operações foram explicadas de forma a possibilitar sua replicação em outros sistemas de informação geográfica, utilizando funções semelhantes.

Durante a construção do mesmo, priorizou-se uma estrutura em módulos, dividindo-se as operações de geoprocessamento em grupos com funções independentes, mas com um sentido completo dentro de cada uma (e.g, uma parte do modelo delimita as bases dos morros, a outra identifica os topos, etc). Isso foi feito para facilitar a depuração do sistema, para deixá-lo mais flexível caso haja, futuramente, quaisquer alterações na legislação e para possibilitar o uso de qualquer um dos módulos em outros modelos. O processamento foi dividido em nove etapas distintas, onde os produtos gerados em cada uma delas são utilizados como dados de entrada nos passos subsequentes. As operações executadas no geoprocessamento e explicadas ao longo do texto foram organizadas em tabelas com o intuito de sistematizar as operações e facilitar a replicação da metodologia pela comunidade acadêmica.

3. Resultados e discussão

Um modelo foi construído com sucesso no ambiente de programação Model Builder. Como dado de entrada, utilizou-se apenas o Modelo Digital de Elevação.

Em todas as operações em que a configuração fosse aplicável, as opções de ambiente (Environments) foram habilitadas para limitar a extensão do processamento ao MDE, bem como a aderência às células desse MDE. Assim, todos os arquivos do tipo matricial (raster) que foram gerados possuíam suas células alinhadas com as do MDE original. As configurações opcionais do software, que não são mencionadas aqui, foram deixadas na forma padrão.

3.1 Delimitação da área limite de cada morro.

A primeira etapa consistiu em mapear as áreas que definem a abrangência de cada morro, assim o que se faz é dividi-los considerando que seus limites são definidos pelos pontos de sela e coincidem também com a rede de drenagem. Esta área é baseada na área de contribuição relativa ao relevo invertido. Esse limite não se confunde com aquele definido por Lei como morro (cujas base é definida pela cota do ponto de sela mais próximo da elevação), tampouco com a Área de Preservação Permanente, haja vista que a primeira contém as demais e não o contrário. Para chegar à delimitação da área compreendida pela Lei como morro, foram efetuadas diversas funções baseadas na delimitação do que poderíamos denominar de forma simplista como base hidrológica dos morros, que são coincidentes com a hidrografia e os pontos de sela.

Em primeiro lugar, consideramos algumas situações em que houve necessidade de um breve pré-tratamento dos dados antes da execução das funções, sobretudo em MDEs que apresentam expressão do microrrelevo, como é o caso daqueles de alta resolução (Chaplot et al., 2006). Nesses, a necessidade do pré-tratamento vem do fato que diminutas imperfeições do relevo poderiam ser consideradas como ponto de sela, o que não possui qualquer sentido prático. Para contornar este problema, utilizou-se um filtro de médias em janela móvel retangular de 3x3 células de dimensão (FOCAL STATISTICS [1.1]). Em seguida, foram removidas as depressões espúrias, ou sinks, desse novo MDE produzido com o comando FILL [1.2].

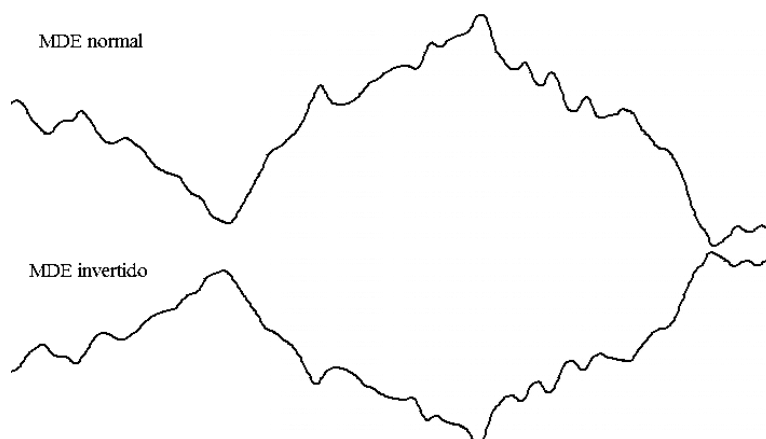


Figura 1 - Relevo normal (acima) e invertido (abaixo).

Com base no MDE produzido neste pré-processamento, a próxima etapa visa inverter o relevo (Figura 1), lançando mão de uma operação de subtração aplicada pela operação MINUS [1.3], onde subtraímos o MDE do valor “8000”. No arquivo matricial gerado, o valor de cada célula será igual a 8000 menos o valor assinalado no MDE anterior para aquela célula. Posteriormente, gerou-se a direção de escoamento do MDE invertido (FLOW DIRECTION [1.4]), a qual foi usada no comando BASIN [1.5] para delimitar as bacias de drenagem, que são delineadas pelas linhas de cumeada entre as mesmas. Essas linhas, que no MDE invertido passam pelos pontos de topo, quando sobrepostas ao relevo normal passam exatamente sobre os pontos de sela. O arquivo matricial produzido pelo comando BASIN foi então convertido para o tipo inteiro (INT [1.6]) e finalmente convertido em um polígono (RASTER TO POLYGON [1.7]). O aspecto final do produto gerado nesta seção é ilustrado na Figura 2.

Tabela 1 - Configurações dos parâmetros nas funções utilizadas na delimitação da área limite de cada morro.

Código	1.1	1.2	1.3	1.4
Função	FOCAL STATISTICS	FILL	MINUS	FLOW DIRECTION
Entrada	Modelo Digital de Elevação (MDE)	“mde_focal”	“mde_fill”	“mde_inv”
Parâmetros	Rect.; 3x3; cell; mean	-	“8000; mde_fill”	-
Saída	“mde_focal”	“mde_fill”	“mde_inv”	“flowdir”
Código	1.5	1.6	1.7	-
Função	BASIN	INT	RASTER TO POLYGON	-
Entrada	“flowdir”	“basin”	“b_int”	-
Parâmetros	-	-	“Field: Value”	-
Saída	“basin”	“b_int”	“basin_pol”	-

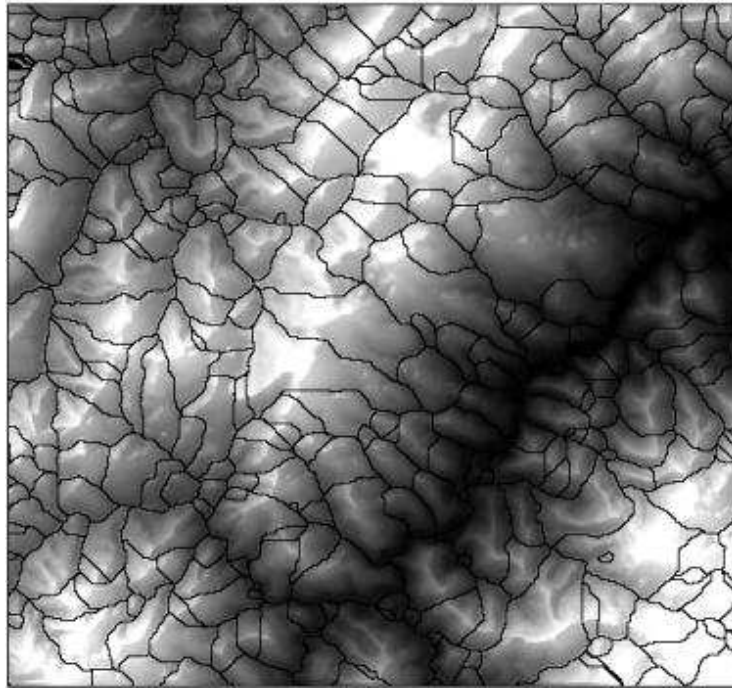


Figura 2 - Produto gerado na primeira etapa da metodologia: área limite de cada morro.

3.2 Localização dos pontos de topo das elevações

Uma vez que os morros foram individualizados, a próxima etapa consistiu em identificar qual é o ponto de topo de cada um dos mesmos. Assim, para cada morro delimitado na seção anterior, foi identificado somente um único ponto de topo, definido pela altitude máxima contida em cada uma dessas áreas. Para tal, nesta seção, além do MDE normal utilizamos o arquivo de saída gerado na função RASTER TO POLYGON [1.7], o qual contém o limite de cada um dos morros.

Na primeira função executada nesta etapa (ZONAL STATISTICS [2.1]), foi calculada a estatística zonal com base no limite definido pelo arquivo vetorial do limite dos morros, onde o valor máximo presente no MDE dentro desta área foi assinalado em todas as células contidas na mesma. Em seguida, esse arquivo matricial foi igualado ao MDE na função RASTER CALCULATOR [2.2], de forma que as células que assumissem valores verdadeiros para a expressão foram assinaladas com o valor 1 e as demais com valor 0. Em outras palavras, dentro de uma área que define o morro, haverá um único ponto onde o valor máximo de altitude naquela zona será igual à altitude do MDE, que são justamente os pontos de topos. Essa matriz foi então reclassificada (RECLASSIFY [2.3]), convertendo os valores “0” para “NoData” e mantendo os valores “1” da mesma forma. Em seguida, converteu-se esse arquivo para o formato vetorial de pontos (Figura 3) com a função RASTER TO POINT [2.4] e, por fim, adicionou-se a estes pontos o

seu valor de altitude, na tabela de atributos (ADD SURFACE INFORMATION [2.5]).

Tabela 2 - Configurações dos parâmetros nas funções utilizadas na localização dos pontos de topos. Nomes seguidos de asteriscos representam arquivos onde houve somente adição de informações na tabela de atributos.

Código	2.1	2.2	2.3
Função	ZONAL STATISTICS	RASTER CALCULATOR	RECLASSIFY
Entrada	Zone data: "basin_pol"; Field: Value; raster: MDE.	"basin_max"; MDE.	"topo_max"
Parâmetros	Statistics: Maximum	"%basin_max%" == "%MDE%"	Field: Value; 0 = NoData; 1=1.
Saída	"basin_max"	"topo_max"	"topo_1"
Código	2.4	2.5	-
Função	RASTER TO POINT	ADD SURFACE INFORMATION	-
Entrada	"topo_1"	"ponto_topo"; MDE	-
Parâmetros	-	Output Property: "Z"	-
Saída	"ponto_topo"	"ponto_topo"*	-

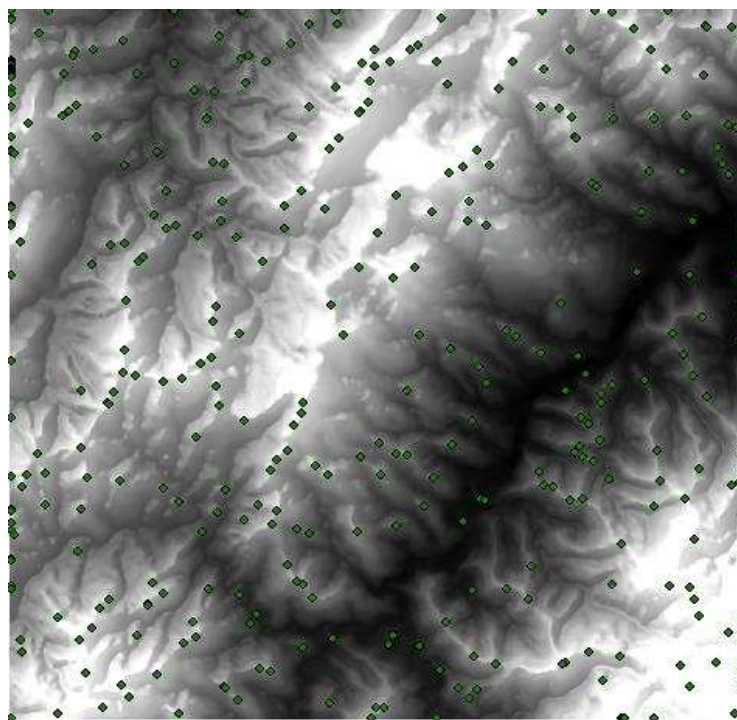


Figura 3 - Produto gerado na segunda etapa da metodologia: ponto de topo dos morros.

3.3 Identificação dos pontos de sela

Os pontos de sela foram delimitados com base na área limite de cada morro (Figura 2a), considerando que as linhas que definem esses limites passam justamente sobre os pontos de sela, sendo sua localização precisamente coincidente com o ponto de máxima altitude dessas linhas. Uma vez localizados, em seguida se determinará qual dos pontos de sela é o mais próximo de cada elevação.

Inicialmente, converteu-se o arquivo vetorial poligonal, que delimita os limites dos morros (gerado na etapa 1.7), para o formato de linhas (FEATURE TO LINE [3.1]). Esse arquivo gerado, que contém as linhas individualizadas, foi utilizado em seguida na função ZONAL STATISTICS [3.2], onde as linhas foram colocadas como zona e o Modelo Digital de Elevação como valores de entrada. Para cada linha, foi então indexado o valor máximo de altitude do MDE, levando em conta a região de abrangência de cada linha separadamente. Como resultado, foi gerado um arquivo matricial onde cada linha continha somente um único valor, que é a altitude máxima da mesma. Sendo conhecida a altitude, onde essas linhas interceptam o ponto de sela, foi necessário igualar o arquivo matricial ao MDE através da função RASTER CALCULATOR [3.3]. O resultado foi um novo arquivo matricial, que continha somente células com valor unitário onde a altitude do MDE se igualava à altitude do ponto de sela, para cada uma das linhas consideradas anteriormente e valor zero para as demais. Em seguida, reclassificou-se esse último arquivo (RECLASSIFY [3.4]), eliminando os valores nulos e deixando apenas as células com valor unitário, que representam os pontos de sela. O arquivo gerado foi então convertido para o tipo inteiro, com a função INT [3.5] e finalmente convertido para o formato vetorial de pontos (RASTER TO POINT [3.6]).

As duas últimas etapas dessa seção, consistiram em adicionar na tabela de atributos de cada um dos pontos de sela, o respectivo valor da altitude (ADD SURFACE INFORMATION [3.7] e mover esses pontos de sela para coincidir com a sua respectiva linha originária, através de um comando de aderência (SNAP [3.8]), isto porque, sendo gerados a partir de um arquivo matricial, esses pontos estavam localizados no centro das células e não sobre as referidas linhas. A distância usada na aderência deverá ser igual à dimensão da célula do Modelo Digital de Elevação no sentido diagonal. Desta forma, os pontos serão posicionados sobre as linhas na menor distância possível. Foram gerados inúmeros pontos de sela (Figura 4), dos quais, somente aqueles mais próximos de cada

elevação serão utilizados. Essa seleção será abordada na próxima etapa da metodologia.

Tabela 3 - Configurações dos parâmetros nas funções utilizadas na localização dos pontos de sela. Nomes seguidos de asteriscos representam arquivos onde houve somente adição de informações na tabela de atributos.

Código	3.1	3.2	3.3
Função	FEATURE TO LINE	ZONAL STATISTICS	RASTER CALCULATOR
Entrada	"basin_pol"	Zone data: "basin_polyline"; Value Raster: "MDE"	"MDE"; "max_linhabase"
Parâmetros	Preserve attributes	Statistics: Maximum	"%MDE%" == "%max_linhabase%"
Saída	"basin_polyline"	"max_linhabase"	"pontosela_rst"
Código	3.4	3.5	3.6
Função	RECLASSIFY	INT	RASTER TO POINT
Entrada	"pontosela_rst"	"max_um"	"int_max_um"
Parâmetros	"0: NoData", "1 : 1"	-	-
Saída	"max_um"	"int_max_um"	"pontosela_shp"
Código	3.7	3.8	
Função	ADD SURFACE INFORMATION	SNAP	
Entrada	"pontosela_shp"; "MDE"	"pontosela_shp"; "basin_pol"	
Parâmetros	-	Type: "EDGE"; Distance: <u>tamanho da célula do MDE</u>	
Saída	"pontosela_shp"*	-	

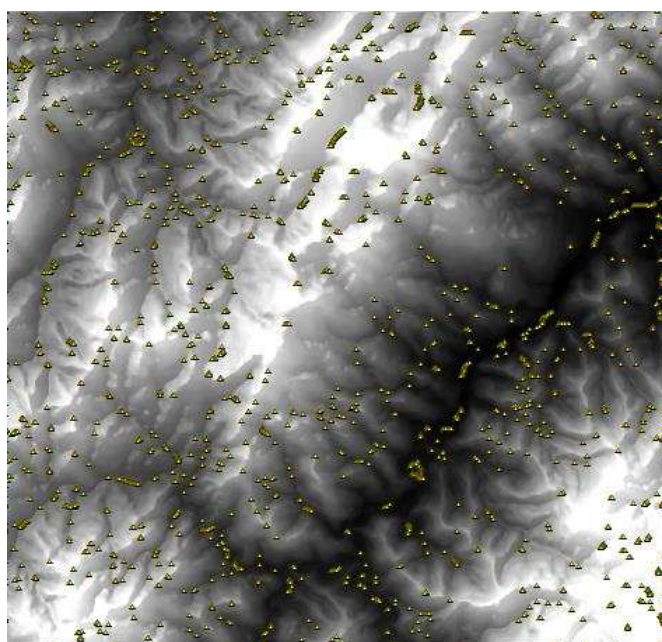


Figura 4 - Produto gerado na terceira etapa da metodologia: pontos de sela.

3.4 Identificação dos pontos de sela mais próximos das elevações

Tendo localizado os pontos de topo dos morros e os pontos de sela, procedeu-se a uma série de funções, que visaram indexar em cada ponto de elevação (topo) os dados do ponto de sela mais próximo, provenientes da tabela de atributos desses. O ponto de sela mais próximo de cada elevação, mais adiante, será utilizado para definir a base do morro, segundo o Novo Código Florestal.

Primeiramente foi localizado, para cada elevação, o ponto de sela mais próximo, dentre aqueles previamente mapeados. Através da função GENERATE NEAR TABLE [4.1], as coordenadas do ponto de sela mais próximo de cada topo foram tabuladas em uma planilha. Essas coordenadas então foram vinculadas à tabela de atributos do arquivo shapefile que continha os pontos de topo, utilizando a ferramenta JOIN FIELD [4.2]. A mesma ferramenta foi utilizada, em seguida, para resgatar o valor da altitude dos pontos de sela para a tabela dos pontos de topos. Os referidos valores foram obtidos diretamente dos pontos de sela (JOIN FIELD [4.3]).

Com as funções executadas até aqui nesta seção, em síntese, o que se fez foi adicionar informações dos pontos de sela à tabela de atributos do shapefile de pontos de topo, as quais sejam: o código identificador do ponto de sela mais próximo, sua distância, latitude, longitude e altitude. Com essas informações reunidas, foi possível calcular a diferença de altitude entre o topo da elevação e seu ponto de sela mais próximo. Adicionou-se um novo campo na tabela de atributos dos pontos de topo (Add Field [4.4]), o qual foi utilizado para calcular essa diferença (CALCULATE FIELD [4.5]). Em seguida, as informações contidas no shapefile com os pontos de topo foram transferidas para os polígonos que contém os limites dos morros (SPATIAL JOIN [4.5]) e uma nova geoinformação foi criada.

Até o final dessa etapa, no total foram produzidas três informações espaciais: os pontos de topo, pontos de sela e um limite dos morros contendo informações dos anteriores (Figura 5).

Tabela 4 - Configurações dos parâmetros nas funções utilizadas na determinação dos pontos de sela mais próximos das elevações. Nomes seguidos de asteriscos representam arquivos onde houve somente adição de informações na tabela de atributos.

Código	4.1	4.2	4.3
Função	GENERATE NEAR TABLE	JOIN FIELD	JOIN FIELD
Entrada	Input: "ponto_topo"; Near: "pontosela_shp"	Input Table: "ponto_topo"; Input Field: "pointid" Join Table: "sela_prox" Output Field: "IN_FID"	Input Table: "ponto_topo"; Input Field: "NEAR_FID" Join Table: "pontosela_shp" Output Field: "OBJECTID"
Parâmetros	Location; Find only closest...	Join Fields: <u>Selecionar todos</u>	Join Fields: "Z"
Saída	"sela_prox"	"ponto_topo"*	"ponto_topo"
Código	4.4	4.5	4.5
Função	ADD FIELD	CALCULATE FIELD	SPATIAL JOIN
Entrada	"ponto_topo"	"ponto_topo"	Input: "basin_pol" Join Features: "ponto_topo"
Parâmetros	Field Name: "dif_H"; Field Type: "Double"	Field Name: "dif_H"; Expression: "[Z] - [Z_1]"	Join Operation: "One to one" Match Option: "Intersect"
Saída	"ponto_topo"*	"ponto_topo"*	"basin_join"

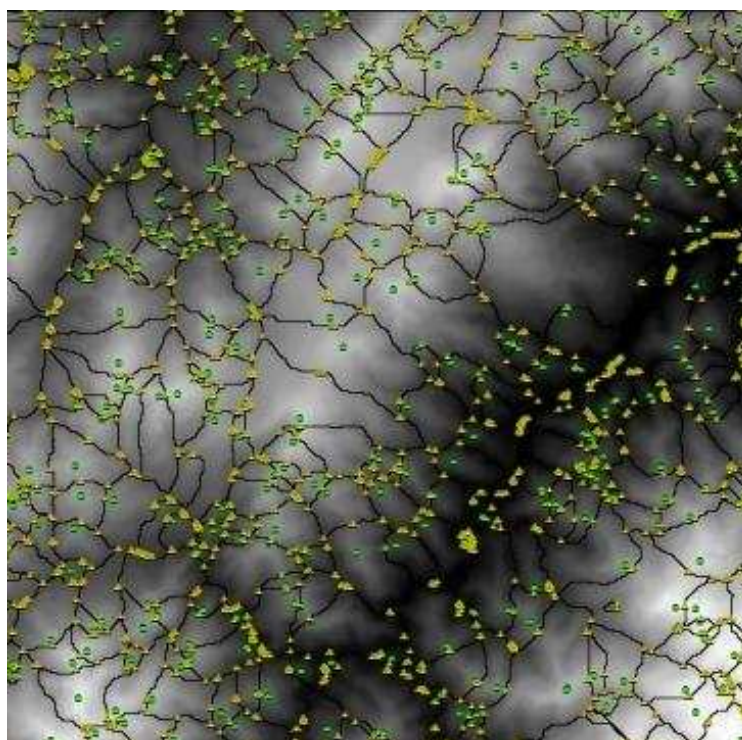


Figura 5 - Produto gerado na quarta etapa da metodologia: limites dos morros com dados dos pontos de sela e ponto de topo.

3.5 Delimitação da base do morro pela cota ponto de sela

Até aqui, o que se chamou de limite do morro era somente uma primeira separação dos mesmos. Nessa área previamente delimitada, estavam incluídos todos os pontos de sela que circundam uma elevação. Todavia, para efeitos de aplicação da Lei, a base do morro é definida pela cota do ponto de sela mais próximo da elevação, cuja localização foi explanada anteriormente. De forma simplificada, o que se fez nessa próxima etapa foi considerar, dentro da área limite de cada morro, somente as células onde a altitude fosse igual ou superior àquela do ponto de sela. Operacionalmente isto se deu de forma bastante simples, bastando seis operações para tal.

A partir dos limites dos morros, contendo as informações dos pontos de topo e sela, foi criado um arquivo temporário (MAKE FEATURE LAYER [5.1]) que possibilitou sua conversão para o tipo matricial (POLYGON TO RASTER [5.2]). A informação utilizada para assinalar os valores, nesse novo arquivo, foi a altitude do ponto de sela. Criou-se, portanto, um arquivo matricial onde cada zona, definida pelos limites de cada morro, possuía o valor relativo à altitude do ponto de sela em suas células. Em seguida, calculou-se a diferença entre os valores das células do Modelo Digital de Elevação e esta matriz (RASTER CALCULATOR [5.3]), retornando valor unitário somente para as células onde o resultado fosse igual ou maior que zero, e valor zero para as demais. Esse, por sua vez, foi reclassificado considerando somente as células com valor unitário (RECLASSIFY [5.4]) e convertido para o formato vetorial com a função RASTER TO POLYGON [5.5].

Os morros que compartilhavam pontos de sela em comum ficaram unidos como uma única área. Por essa razão, foi necessário intersectar essas áreas utilizando os limites dos morros para individualizá-los (INTERSECT [5.6]). Com isto, produziu-se um novo arquivo que representa a base dos morros (Figura 6), segundo o artigo 4 da Lei 12.651/2012, definidos pela cota do ponto de sela mais próximo da elevação.

Tabela 5 - Configurações dos parâmetros nas funções utilizadas para delimitação da base do morro pela cota do ponto de sela.

Código	5.1	5.2	5.3
Função	MAKE FEATURE LAYER	POLYGON TO RASTER	RASTER CALCULATOR
Entrada	“basin_join”	“basin_join_lyr”	-
Parâmetros	Field Info: <u>Selecionar todos como visíveis</u>	Value Field: “Z_1”; Cell Ass. Type: “cell_center”; Cellsize: “MDE”	“%MDE%” - “%h_sela%” >= 0
Saída	“basin_join_lyr”	“h_sela”	“base1”
Código	5.4	5.5	5.6
Função	RECLASSIFY	RASTER TO POLYGON	INTERSECT
Entrada	“basemorro1”	“base_morro”	“bs_morro1”; “basin_join”
Parâmetros	Field: Value 0 : NoData 1: 1	Field: Value	Join Attributes: “ALL”; Output Type: “Input”
Saída	“base_morro”	“bs_morro1”	“base_legal”

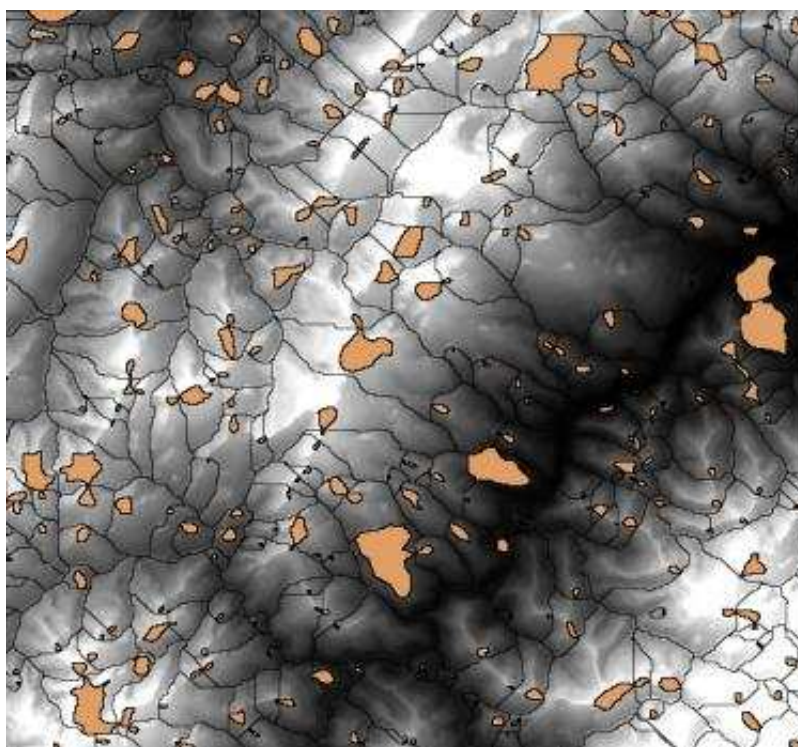


Figura 6 - Produto gerado na quinta etapa da metodologia: base do morro definida pela cota do ponto de sela.

3.6 Cálculo da declividade média dos morros

O novo Código Florestal não define os critérios que devem ser utilizados para o cálculo da declividade média, a qual deve ser superior a 25 graus para que o terço superior de um morro seja considerado APP. Considerando que há diferentes

métodos para mensurar a declividade, bem como diferentes números de medições podem ser usados para se obter uma média, a lei abre nesse ponto um enorme espaço para a subjetividade.

Em Oliveira & Fernandes Filho (2013), propõe-se que a declividade seja calculada pela função Slope (3D Analyst) e que, em seguida, seja calculada a média das células presentes em cada morro, por uma estatística zonal. No presente artigo, o que se propõe é criar inúmeras linhas imaginárias que ligam o topo à linha de base do morro e calcular a média das declividades obtidas nas mesmas. Assim, assegura-se que as encostas mais íngremes de uma elevação sejam sempre consideradas no cálculo. A seguir são descritos os processos executados para o cálculo da declividade média e seleção dos morros com esse valor superior a 25 graus.

Primeiramente, transformaram-se os vértices dos polígonos das bases dos morros em pontos, com a ferramenta FEATURE VERTICES TO POINTS [6.1]. A esses pontos, adicionaram-se na tabela de atributos as coordenadas XY (ADD XY COORDINATES [6.2]). Nessa tabela, foi criado um novo campo (ADD FIELD [6.3]), onde os valores das altitudes dos topos foram copiados (CALCULATE FIELD [6.4]) com um novo nome. Isto foi feito porque as altitudes que estavam nessa tabela, foram tabuladas num campo criado automaticamente pelo software. Para os cálculos posteriores foi necessário estabelecer um novo campo e apagar aquele anterior (DELETE FIELD [6.5]), para que os cálculos subsequentes não sobrepusessem os valores previamente calculados.

Considerando que os pontos criados sobre a linha de base do morro possuem a mesma cota do ponto de sela, o que se fez foi obter o valor do arquivo matricial, que continha a altitude dos pontos de sela e adicioná-los aos pontos como seu valor de altitude (ADD SURFACE INFORMATION [6.6]). As coordenadas XY dos topos foram adicionadas em sua tabela de atributos (ADD XY COORDINATES [6.7]) e posteriormente anexadas à tabela dos pontos relativos à sua respectiva linha de base (JOIN FIELD [6.8]).

Para cada ponto situado sobre a linha de base dos morros agregou-se as informações da altitude e a localização, tanto desses próprios pontos quanto dos respectivos pontos de topo. Esses dados possibilitaram o cálculo da tangente da linha imaginária que une os topos às bases dos morros, pela aplicação do teorema de Pitágoras. Num novo campo criado (ADD FIELD [6.9]), calculou-se a diferença entre a altitude dos pontos de topo e de sela e dividiu-se esse valor pela raiz quadrada do somatório dos desvios das distâncias ao quadrado (CALCULATE FIELD [6.10]). Como resultado, obteve-se, para cada ponto, o valor da tangente

dada pelo ângulo que define a declividade entre o topo e este mesmo ponto, localizado sobre a base do morro. Dos inúmeros pontos criados sobre a linha de base do morro, somente alguns serão amostrado, visto que esse procedimento possui alto custo computacional.

Para assegurar que pontos relativos aos limites de morros vizinhos não fossem amostrados, efetuou-se uma contratura dos polígonos que definem as bases dos morros, com uma distância equivalente ao tamanho das células do MDE, utilizando-se uma distância negativa no comando BUFFER [6.11]. Então, os pontos situados sobre as bases dos morros, foram afastados para coincidir com esse novo limite criado (SNAP [6.12]) e, por fim, foram selecionados somente os pontos que estavam dentro do polígono que define a base do morro, com a função CLIP [6.13], utilizando uma tolerância espacial de 1 metro (10% do tamanho da célula do MDE). Alguns pontos localizados próximo à drenagem, apresentaram valores negativos para a tangente (o que era esperado, pois a drenagem está numa cota inferior a deles), por esta razão foram selecionados para o cálculo da declividade somente aqueles com valores iguais ou superiores a zero (SELECT [6.14]).

Os pontos selecionados para cálculo da declividade foram então convertidos para o formato matricial, com o valor das tangentes previamente calculados (POINT TO RASTER [6.15]). Com base no valor da tangente, foi calculada a angulação em radianos, pela função do arco tangente. Multiplicando-se o valor em radianos por 180 e dividindo-se por π (RASTER CALCULATOR [6.16]), chegou-se à declividade entre cada ponto localizado sobre a linha de base e o topo do morro.

Por fim, calculou-se a média das declividades calculadas definindo como zona limite a base dos morros (ZONAL STATISTICS [6.17]). Reclassificou-se a matriz exportando somente os valores unitários (RECLASSIFY [6.18]), que representam os morros cuja declividade média é igual ou superior a 25 graus (Figura 7).

Tabela 6 - Configurações dos parâmetros nas funções utilizadas para o cálculo da declividade média dos morros. Nomes seguidos de asteriscos representam arquivos onde houve somente adição de informações na tabela de atributos.

Código	6.1	6.2	6.3
Função	FEATURE VERTICES TO POINTS	ADD XY COORDINATES	ADD FIELD
Entrada	“base_legal”	“vertices_base”	“vertices_base”
Parâmetros	Point Type: All	-	Field Name: “Z_topo”; Field Type: “double”

Saída	“vertices_base”	“vertices_base”*	“vértices_base”*
Código	6.4	6.5	6.6
Função	CALCULATE FIELD	DELETE FIELD	ADD SURFACE INFORMATION
Entrada	“vertices_base”	“vertices_base”	Feature Class: “vertices_base” Surface: “h_sela”
Parâmetros	Field Name: “Z_topo”; Expression: “[Z]”	Drop Field: “Z_1”; “dif_H”	-
Saída	“vertices_base”*	“vértices_base”*	“vertices_base”*
Código	6.7	6.8	6.9
Função	ADD XY COORDINATES	JOIN FIELD	ADD FIELD
Parâmetros	-	Join Fields: “point_x”, “point_y”	Field Name: “tng_a”; Field Type: “float”
Saída	“ponto_topo”*	“vértices_base”*	“vertices_base”*
Código	6.10	6.11	6.12
Função	CALCULATE FIELD	BUFFER	SNAP
Entrada	Field: “tng_a” Expression: ([Z_topo]-[Z])/ Sqr((([POINT_X_1] - [POINT_X]) * ([POINT_X_1] - [POINT_X])) + (([POINT_Y_1] - [POINT_Y]) * ([POINT_Y_1] - [POINT_Y])))	“base_legal”	“vertices_base”
Parâmetros	-	Distance: “-10 Meters”	Snap Environment: “buffer_inv”; Type: “Edge”; Distance: “10 Meters”
Saída	“vertices_base”*	“buffer_inv”	-
Código	6.13	6.14	6.15
Função	CLIP	SELECT	POINT TO RASTER
Entrada	Input: “vertices_base”; Clip: “buffer_inv”	“amostra_decl”	“vertices_base”
Parâmetros	XY Tolerance: <u>10% do tam. de célula do MDE</u>	Expression: "tng_a" >= 0	Value Field: “tng_a”; Cell Size: “MDE”
Saída	“amostra_decl”	“amostra_sel”	“tangente_a”
Código	6.16	6.17	6.18
Função	RASTER CALCULATOR	ZONAL STATISTICS	RECLASSIFY
Entrada	“tangente_a”	Zone: “base_legal” Value: “angulo_graus”	“dec_media”
Parâmetros	Expression: ATan((" %tangente_a%")) * (180 / 3.1415926)	Statistics type: Mean	“0 – 25: NoData; 25 – 90: 1”
Saída	“angulo_graus”	“dec_media”	“dec_med_25g”

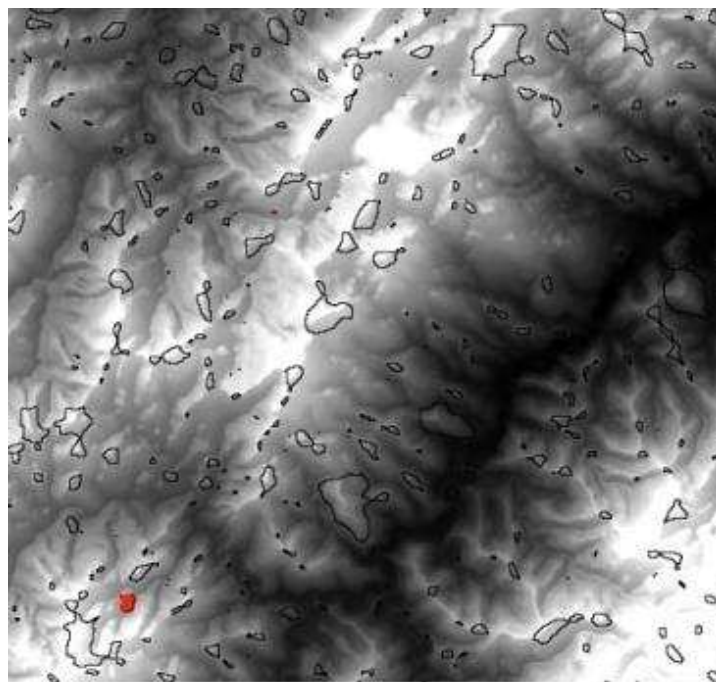


Figura 7 - Produto gerado na sexta etapa da metodologia: morros com declividade média superior a 25 graus;

3.7 Mensuração da altura dos morros

Outro critério definido em lei, para que um morro possua Área de Preservação Permanente, é a altura do mesmo. Tendo como base a cota do ponto de sela, a altura deve ser igual ou superior a 100 metros. Uma vez que já foram produzidos os limites da base dos morros, bastou calcular a amplitude da altitude em cada uma dessas áreas e reclassificar o resultado, deixando somente aqueles com valor superior a 100.

Utilizou-se a função ZONAL STATISTICS [7.1], para calcular a amplitude da altitude dentro dos limites dos morros, obtendo-se os valores com base no Modelo Digital de Elevação. Em seguida, eliminaram-se aqueles morros onde a altura foi inferior a 100 metros (RASTER CALCULATOR [7.2]) e, por fim, essa matriz produzida, que continha valores 0 e 1, foi reclassificada (RECLASSIFY [7.3]), considerando somente os valores unitários, que representam os morros com altura igual ou superior a 100 metros (Figura 8).

Tabela 7 - Configurações dos parâmetros nas funções utilizadas para o cálculo da altura dos morros.

Código	7.1	7.2	7.3
Função	ZONAL STATISTICS	RASTER CALCULATOR	RECLASSIFY
Entrada	Zone data: "base_legal"; Value raster: MDE.	"altura_morro"	"0: NoData; 1: 1"
Parâmetros	Statistics:	Expression:	-

	Range	"%altura_morro%" >= 100	
Saída	"altura_morro"	"morro_100"	"morro100m"

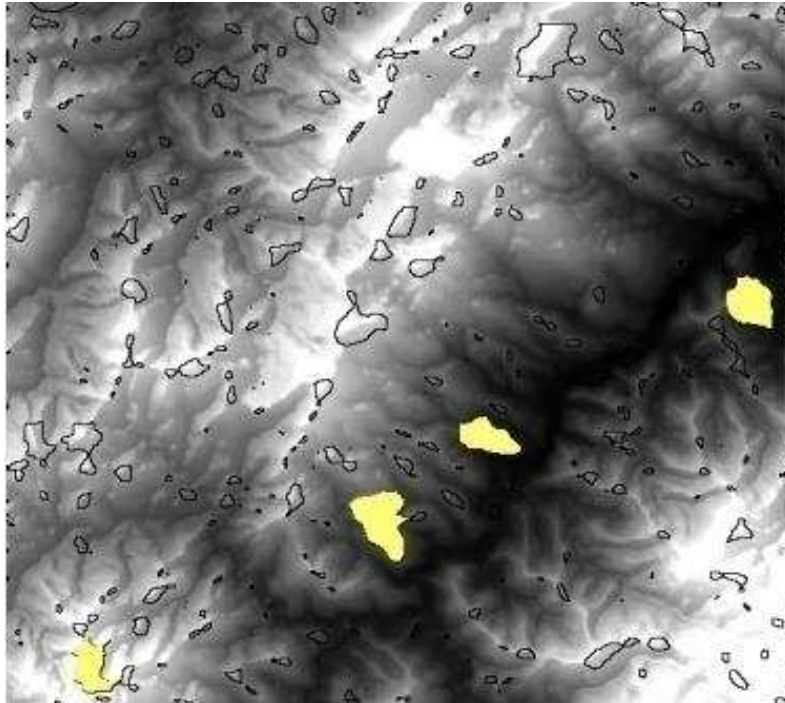


Figura 8 - Produto gerado na sétima etapa da metodologia: morros com altura superior a 100 metros.

3.8 Delimitação do terço superior dos morros

Ainda que um morro atenda aos critérios de declividade média e a altura, a extensão da Área de Preservação Permanente compreende somente o terço superior do mesmo. A delimitação das APPs considerou a proporção equivalente ao terço maior da amplitude de cada morro.

Calculou-se, para cada célula presente nas áreas dos morros, a diferença entre a altitude nessa célula (dada pelo MDE) e a altitude do ponto de sela naquele morro (RASTER CALCULATOR [8.1]). Paralelamente, tendo como zona de análise a base do morro definida pela cota do ponto de sela, calculou-se a amplitude da altitude em cada uma dessas áreas previamente delimitadas (ZONAL STATISTICS [8.2]). O terço superior foi delimitado, dividindo-se a diferença entre os valores do MDE e a cota do ponto de sela, pela amplitude da altitude em cada morro (RASTER CALCULATOR [8.3]), onde as células em que esta razão fosse de valor igual ou superior a 0,667 (equivalente a um terço), foram assinaladas com valor unitário e as demais com valor zero. Em seguida, essa matriz foi

reclassificada, deixando somente as células com valor unitário, que correspondem ao terço superior dos morros (RECLASSIFY [8.4]), ilustrado na Figura 9.

Tabela 8 - Configurações dos parâmetros nas funções utilizadas para delimitação do terço superior.

Código	8.1	8.2	8.3	8.4
Função	RASTER CALCULATOR	ZONAL STATISTICS	RASTER CALCULATOR	RECLASSIFY
Entrada	"h_sela"; "MDE"	Zone data: "base_legal"; Value raster: "MDE"	"mde_psela"; "range_morro"	"ter_sup"
Parâmetros	"%MDE%" - "%h_sela%"	Statistics Type: "Range"	"%mde_psela%" / "%range_morro%" >= 0.667	"0: NoData"; "1:1"
Saída	"mde_psela"	"range_morro"	"terco_01"	"terco_sup"

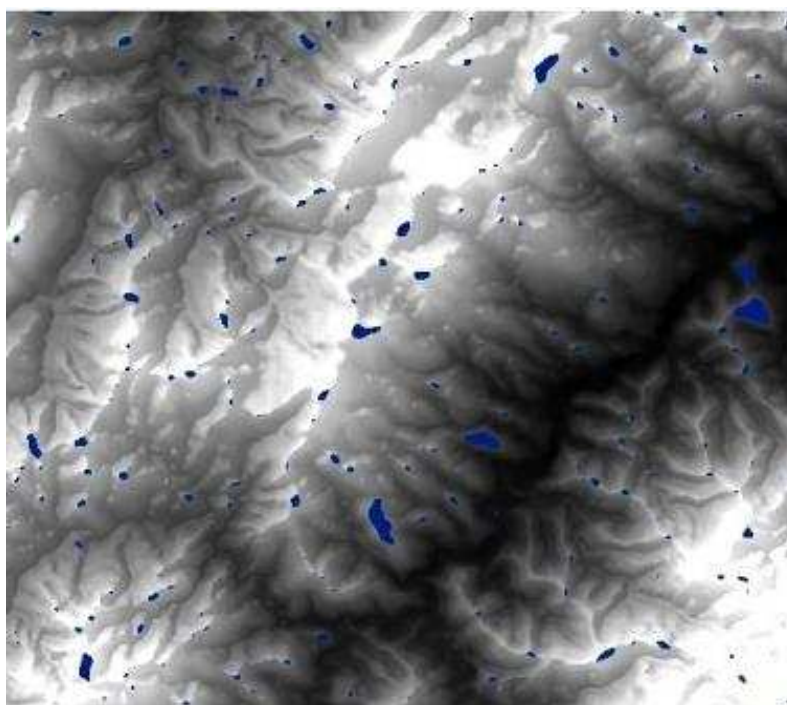


Figura 9 - Produto gerado na sétima etapa da metodologia: terços superiores.

3.9 Delimitação das Áreas de Preservação Permanente

Uma vez mapeados os morros que atendem aos critérios de altura superior a 100 metros e declividade média superior a 25 graus, individualmente, bastou verificar quais deles os atendem simultaneamente, para que seu terço superior seja classificado como Área de Preservação Permanente. Para tal, multiplicaram-se os arquivos matriciais que representam os morros com altura maior que 100 metros e

com declividade superior a 25 graus, ambos com somente valores unitários (TIMES [9.1]).

Foi produzida uma nova matriz, cujas células identificam os morros que atendem aos dois parâmetros. Essa, por sua vez, foi multiplicada pela matriz dos terços superiores (TIMES [9.2]), resultando nas Áreas de Preservação Permanente em topos de morros. O resultado foi então convertido para o formato vetorial poligonal (RASTER TO POLYGON [9.3]).

Tabela 9 - Configurações dos parâmetros nas funções utilizadas para delimitação das Áreas de Preservação Permanente em topos de morros.

Código	9.1	9.2	9.3
Função	TIMES	TIMES	RASTER TO POLYGON
Entrada	“morro100m”; “dec_med_25g”	“alt_x_dec”; “terco_sup”	“app_rstr”
Parâmetros	-	-	-
Saída	“alt_x_dec”	“app_rstr”	“app_topos_de_morro”

3.10 Sistematização das operações

Em razão da complexidade das operações efetuadas, justificou-se a organização das mesmas de forma sistêmica, em um fluxo de trabalho elaborado em ambiente de programação Model Builder™ 10.1.

Foi construída uma ferramenta, onde cada seção anteriormente explanada foi organizada em uma etapa (modelo) da mesma, possibilitando a repetição da metodologia de forma simplificada (Figura 10). A construção da ferramenta permitirá ainda que a metodologia seja publicada e compartilhada com a comunidade acadêmica, através de sua disponibilização para download.

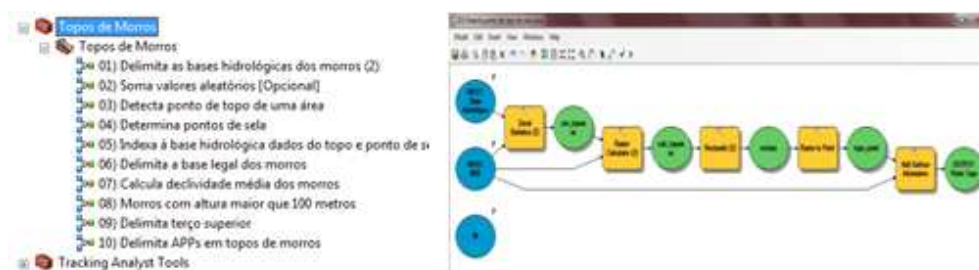


Figura 10 - Captura de tela. À esquerda, visualização da ferramenta no ArcToolbox. À direita, exemplo de uma etapa construída no ambiente de programação Model Builder.

3.11 Mapas de Áreas de Preservação Permanente em topos de morros

O desenvolvimento do modelo de mapeamento automático e a sistematização das operações possibilitaram a produção de um mapa de APPs em

topos de morros (Figura 11), de forma rápida e organizada. A criação de mapas em larga escala torna-se viável com a utilização da metodologia proposta.

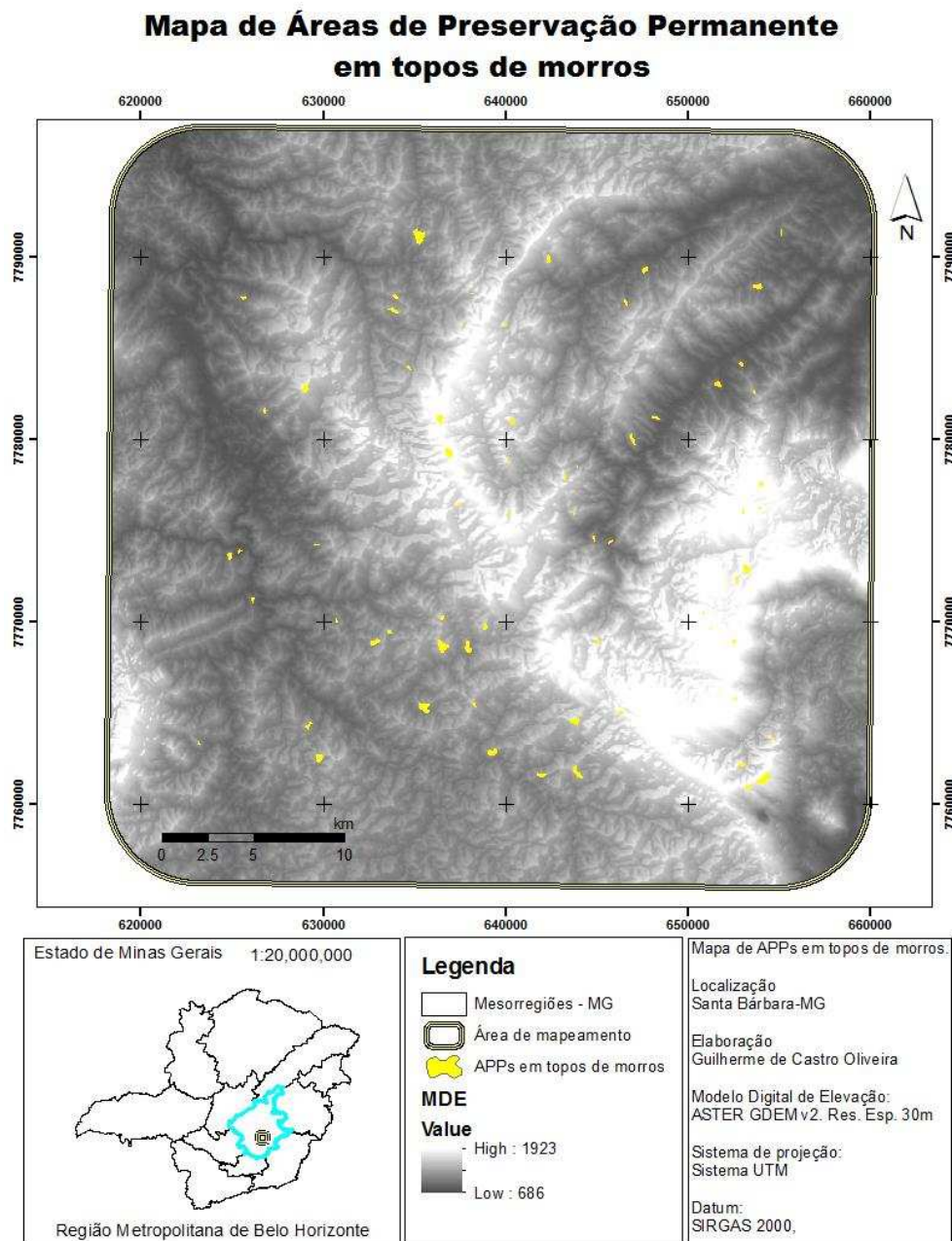


Figura 11 - Produto final da metodologia. Mapa de Áreas de Preservação Permanente em topos de morros.

4. Conclusões

O sensoriamento remoto e os sistemas de informação geográfica são ferramentas essenciais para a gestão ambiental e o monitoramento dos recursos naturais. Como vantagens, trazem maior celeridade aos mapeamentos e produzem dados georreferenciados e organizados em bancos de dados. O modelo metodológico apresentado no presente trabalho representa uma nova oportunidade

nesse aspecto, vindo ao encontro da proposta do novo Código Florestal, que já incorpora em sua essência o reconhecimento das geociências enquanto institui o Cadastro Ambiental Rural (CAR), o qual prevê o registro georreferenciado de todas as propriedades rurais no Brasil.

Dada a complexidade do mapeamento das APPs em topos de morros, bem como as subjetividades envolvidas no mesmo, é conveniente que o mapeamento seja executado pelo próprio Estado e os resultados sejam disponibilizados na plataforma do CAR, para serem acessados pelos usuários.

No presente trabalho, apresenta-se uma metodologia eficiente para delimitação automática de APPs em topos de morros. Todavia, há algumas questões que devem ser definidas em lei para que haja menos subjetividade no mapeamento, nomeadamente a escala adequada para o mapeamento e o método para cálculo da declividade média. Uma vez que a norma for estabelecida, prevê-se menor discrepância entre os resultados produzidos por diferentes analistas.

Capítulo 5

Aspectos técnicos da delimitação de Áreas de Preservação Permanente em topos de morros: estudo de caso e simulação de cenários.

RESUMO – No presente trabalho, são discutidas questões técnicas envolvidas no mapeamento digital de Áreas de Preservação Permanente (APPs) em topos de morros, que por não estarem definidas objetivamente na Lei 12.651/2012, levam a disparidade em mapas produzidos por diferentes métodos e bases de dados. Utilizando-se de modelos digitais de elevação (MDEs), efetuou-se a delimitação das APPs na área que envolve o Parque Nacional da Serra do Gandarela (MG). As análises também incluem: a) uma simulação de cenários, onde se verificou a variação da área protegida com a alteração dos critérios e da metodologia de cálculo da declividade, b) avaliação dos erros nas estimativas de altura e declividade média dos morros e, c) influência da escala de mapeamento na delimitação das APPs. Os resultados mostram que, independente do produto cartográfico utilizado, as APPs em topos de morros ocupam uma fração mínima da paisagem. Pela simulação de cenários, constatou-se que o critério de declividade média é limitante, uma vez que, ao reduzir a exigência desse parâmetro houve mais ganho de área protegida. Em todos os MDEs utilizados, há tendências de subestimação, tanto na altura dos morros quanto na declividade, representada pelo modelo digital de declividade. Isso significa que, ao utilizar MDEs para o mapeamento de APPs em topos de morro, é necessário ajustar os valores dos critérios definidos em lei para produzir mapas mais consistentes. Por diferentes análises, explicitou-se a importância da escala de mapeamento, enquanto definidora do fenômeno, motivo pela qual deveria ser fixada em Lei. Constatou-se que MDEs de alta resolução com tamanho de célula inferior a 30m, não são condizentes com a realidade prática do mapeamento.

Palavras-chave: Mapeamento, APPs, Topos de morros

1. Introdução

O mapeamento das Áreas de Preservação Permanente (APPs) em topos de morros envolve questões técnicas de cartografia e geoprocessamento, até o momento, pouco abordadas pela comunidade acadêmica. Há incertezas quanto à consistência dos produtos cartográficos utilizados (modelos digitais de elevação) e subjetividades deixadas pela redação da lei, os quais podem levar a diferentes resultados e subestimação da área mapeada. Ainda que o mapeamento digital das APPs em topos de morros seja a opção de menor custo e de resultados mais rápidos, há que se conhecer a confiabilidade dos mapas produzidos.

Há três fontes de erros nos dados, que podem comprometer diretamente a qualidade do mapeamento: (i) subestimação da declividade pelos modelos digitais de declividade; (ii) superestimação da altitude dos pontos de sela e; (iii) subestimação da altitude dos topos, os quais levam à subestimação da área classificada como APP. Idealmente, espera-se que haja equilíbrio entre superestimativas ou entre subestimativas nos pontos de sela e de topo. Caso contrário, estaríamos diminuindo ou aumentando a altura estimada dos morros. Em outras palavras, se a altitude do ponto de sela está sendo superestimada, a altitude do topo deverá ser igualmente superestimada, para que a altura do morro esteja correta. Se houver uma tendência de sub ou superestimação dos valores de altitude para estas áreas, será necessário estabelecer um intervalo de confiança a ser adotado no mapeamento. Como é sabido que na medida em que se reduz a resolução de um MDE, a sua capacidade de representar os pontos extremos da topografia também é diminuída, há possibilidade de haver subestimação dos valores de altitude nos pontos definidos como topos.

Além dos erros altimétricos, inerentes aos MDEs, há também lacunas deixadas pela Lei 12.651/2012 que causam dúvidas aos analistas. Ao não definir, por exemplo, como deve ser calculada a declividade média de um morro, fica a critério do técnico envolvido escolher qual método será utilizado, bem como, quantas observações serão feitas para calcular a média. Ainda, o agente poderá escolher, no campo ou através de SIG, em quais locais serão feitas as amostragens da declividade.

Outra questão de grande importância é a escala de mapeamento a ser adotada. Os produtos cartográficos provenientes de levantamentos mais específicos retratam o relevo com maior detalhamento. Por outro lado, os MDEs de resolução mais baixa, levam a uma representação mais generalista do relevo. De certo, cada produto possui vantagens e desvantagens para cada aplicação. No caso do

mapeamento de APPs, é preciso estabelecer uma escala de trabalho que seja adequada e condizente com a função dessas áreas.

Com as definições trazidas pelo novo Código Florestal, Lei 12.651/2012, houve uma expressiva redução nessas áreas protegidas, uma vez que os critérios adotados para delimitação são dificilmente atendidos em situações reais (Oliveira & Fernandes Filho (2013), Varjabedian & Mechi (2013), Gasparini et al. (2013)). Além disso, as subjetividades presentes na aplicação da Lei podem fazer com que a redução seja ainda maior.

Diante do exposto, o presente estudo teve três objetivos principais. Em primeiro lugar, fazer um estudo de caso, mapeando as APPs em topos de morros numa área de grande extensão e com relevo forte ondulado. Em segundo lugar, avaliar a importância de cada critério (declividade e altura) aplicado no mapeamento na área total mapeada, através de uma simulação de cenários. Por fim, procedeu-se a uma análise de pontos específicos que contribuem para a subjetividade e divergência de resultados, nomeadamente a escala de mapeamento e a sua influência na delimitação das APPs.

2. Materiais e métodos

2.1 Área de estudo

Como área de estudo desta pesquisa, foi escolhida a serra do Gandarela, localizada na porção nordeste Quadrilátero Ferrífero, no Estado de Minas Gerais (Figura 1). Mais especificamente, a área abrange os limites do Parque Nacional, recentemente instituído pelo Decreto 13 de outubro de 2014 (Brasil, 2014). A extensão total da área de estudo é de 1.000 km². Sua escolha para o presente projeto se justifica por diferentes motivos, discutidos a seguir.

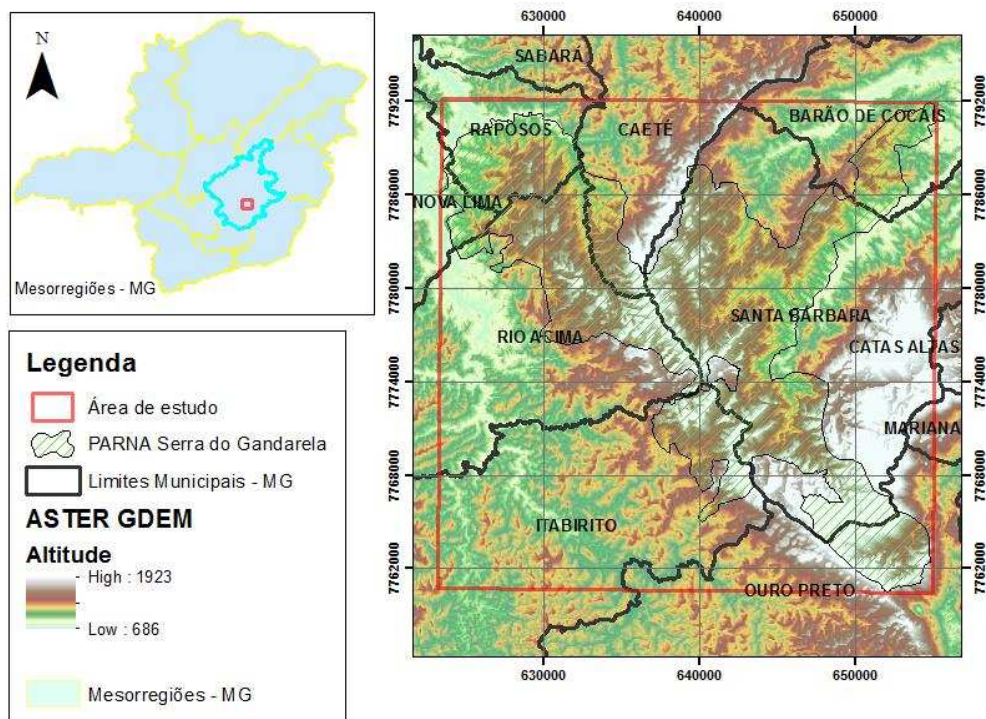


Figura 1 – Localização da área de estudo, abrangendo os limites da área do Parque Nacional da Serra do Gandarela.

Destaca-se a importância ambiental da região, que contém uma das últimas áreas do Quadrilátero Ferrífero em bom estado de conservação, onde a ocupação antrópica ainda não é tão pronunciada. Por se tratar de uma região de transição entre os biomas Mata Atlântica e Cerrado, há um mosaico de formações vegetacionais, condicionado pelo substrato litológico e relevo, onde se destacam os Campos Rupestres (quartzíticos e de cangas) em razão de seu alto índice de endemismo (Lamounier et al., 2008). Encontram-se, ainda, áreas de floresta estacional semidecidual, campo limpo e campo sujo, que abrigam espécies da fauna e flora ameaçadas de extinção.

Pelas condições intensas de dissecamento, o relevo é bastante acidentado, com elevações de perfil côncavo e topos estreitos, entremeadas por vales encaixados, com ocorrência mais restrita de rampas coluvionares embutidas (Carvalho Filho et al., 2010). Quanto à geologia, a Serra do Gandarela é marcada pela diversidade do substrato geológico, onde predominam rochas do Supergrupo Minas e Supergrupo Rio das Velhas, compostos majoritariamente por quartzitos, itabiritos, xistos, filitos, rochas carbonáticas, granitos-gnaisses e cangas (Lamounier et al., 2011). Os solos, de maneira geral, são rasos e a ocorrência de pedregosidade é comum, associada ao expressivo processo de laterização. Há predomínio de Cambissolos Háplicos, Neossolos litólicos e Plintossolos Pétricos e,

em menor expressão, encontram-se também os Latossolos Vermelhos perférricos, de formação pedimentar (Carvalho Filho et al., 2010).

A forte movimentação do relevo, que inclui diversas regiões de ruptura, associada à abundância de água, proporcionou a formação de dezenas de quedas d'água e cachoeiras, as quais constituem forte atrativo para a atividade turística como meio de desenvolvimento sustentável para a região, potencial este que nos dias atuais ainda é pouco explorado (Lamounier et al., 2011). A criação do Parque Nacional da Serra do Gandarela só foi possível diante da grande mobilização da sociedade perante a questão, pois havia (de fato, ainda há) uma incompatibilidade entre os diferentes agentes envolvidos no que diz respeito aos limites que foram estabelecidos para a Unidade de Conservação. A preocupação com a preservação do meio ambiente na região do Gandarela é constante, e muitos grupos ainda não estão satisfeitos com os limites estabelecidos no decreto.

Em segundo lugar, de acordo com o objetivo deste projeto, faz-se necessário a escolha de um local com relevos mais movimentados, para uma validação da metodologia em locais onde haja maior probabilidade de se encontrar APPs em topos de morros. Em Oliveira & Fernandes Filho (2013), foi observado que há poucas chances destas serem encontradas em locais com relevo menos movimentado, em razão dos critérios que definem estas áreas.

E, por fim, a disponibilidade dos dados de levantamento por perfilamento a laser (LIDAR) que contempla parte desta região, definitivamente necessários para a validação da metodologia, cedidos pela companhia Vale S/A.

2.2 Bases de dados

Foram utilizadas, para o mapeamento, quatro bases de dados topográficos de diferentes origens e resoluções espaciais: ASTER GDEM (30m), SRTM (90m), Topodata (30m) e IBGE (10m). Todos eles são representados na forma matricial (modelo digital de elevação), sendo que o MDE produzido com os dados IBGE foi criado por interpolação das curvas de nível, na escala 1:50.000, para criação de um MDE com 10 metros de resolução espacial, através do interpolador Topo to Raster não condicionado hidrologicamente.

Para os estudos relativos à escala de mapeamento e avaliação de erros de estimativa, foi utilizado um MDE com 2m de resolução espacial, obtido através do levantamento a laser pelo sistema LIDAR.

2.3 Simulação de cenários

Além do mapeamento feito com os critérios estabelecidos em lei (declividade média superior a 25 graus e altura superior a 100 metros), procedeu-se a uma simulação, onde esses valores foram alterados, com intuito de avaliar a influência de cada um dos critérios na área total classificada como APP. Para tal, variou-se a declividade média exigida de 25 a 10 graus, de 5 em 5 graus e altura de 100 a 50 metros, de 10 em 10 metros.

Considerou-se, ainda, a declividade reclassificada segundo o valor apropriado em relação ao tamanho de célula de cada MDE. Foram usados valores para os modelos digitais de declividade que correspondem a 25 graus na verdade de campo, os quais sejam: 21,30° para IBGE, 17,48° para ASTER e Topodata e 12,40° para SRTM. Isto é, quanto mais baixa a resolução do MDE utilizado, menor é o valor que deveria ser considerado para classificar uma área como APP, quanto ao critério de declividade média do morro.

Dois métodos diferentes foram utilizados para mensuração da declividade (Figura 2): no primeiro, mediu-se a inclinação de linhas imaginárias que ligam o topo do morro aos inúmeros pontos localizados sobre a cota que define a sua base. No segundo, foi produzido um mapa de declividade com a função SLOPE (3D Analyst) e, em seguida, foi calculada a média das células para cada morro. Uma vez que o método a ser utilizado não é definido em lei, o presente trabalho busca demonstrar a importância desse critério no mapeamento das APPs em topos de morros, através da diferença entre os resultados dos mapeamentos pelos dois métodos.

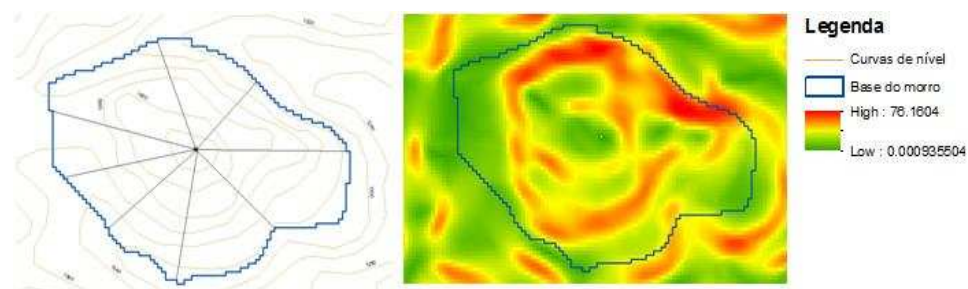


Figura 2 - Métodos de cálculo da declividade média usados no mapeamento e simulações. À esquerda, declividade calculada por linhas ligando o cume à linha de base (Método 1). À direita, declividade calculada pela média do valor das células contidas na área da base do morro (Método 2).

2.4 Mensuração de erros de estimativa da altura dos morros

As áreas de preservação permanente em topos de morros são definidas por basicamente dois pontos na paisagem: cume e ponto de sela. Portanto, torna-se

imprescindível a avaliação dos erros nestes pontos em específico, além da avaliação feita para o MDE de maneira geral.

Para tal, a altura estimada através dos MDEs avaliados foi comparada com aquela que, teoricamente, seria estimada para a mesma área se utilizássemos dados de alta resolução, provenientes do sistema LIDAR.

2.5 Escala de mapeamento e pontos de sela

Buscou-se entender a relação entre a resolução de um MDE utilizado para o mapeamento e o número, a distribuição espacial e a qualidade dos pontos de sela mapeados, considerando nessa última a diferença de altitude entre o cume do morro e seu ponto de sela mais próximo. Para tal, o mapeamento automático foi executado utilizando os dados LIDAR representado em matrizes de tamanhos de células crescentes, através de uma generalização por média das observações de altitude presentes área da célula. Os pontos de sela mais próximos das elevações foram selecionados e exportados para uma nova feição, a partir da qual se calculou a diferença entre a altitude do topo do morro e a altitude do ponto de sela. Assim, calculou-se a altura dos morros definida por cada ponto de sela, como estabelecido em lei. Os dados foram tabelados e submetidos às análises estatísticas.

O padrão de distribuição espacial dos pontos de sela foi verificado por geoestatística pelo método do vizinho mais próximo, que considera a distância média dos pontos ao seu vizinho e compara a mesma com a distância média esperada em uma distribuição normal. A distribuição pode ser classificada como agrupada, aleatória ou dispersa (Figura 3).

Como resultados previstos, esperava-se que na medida em que o tamanho da célula aumentasse, um menor número de pontos de sela seria mapeado e a altura dos morros definidos por eles fosse cada vez maior. Isto é, se realmente os morros são agrupados e os pontos de sela se afastam dos mesmos, podemos esperar que a altura deles seja maior nos mapeamentos executados com dados de baixa resolução. A distância média entre eles também deveria ser crescente, uma vez que eles estariam em menor número e passariam de uma distribuição mais agrupada a uma mais dispersa no espaço geográfico. Com base nos resultados das análises mencionadas, pode ser possível estabelecer um critério para determinar a escala de mapeamento.

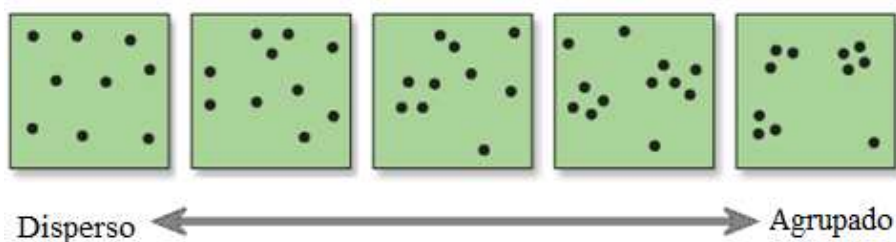


Figura 3 - Padrões de distribuição espacial mensuradas pelo método do vizinho mais próximo. Fonte: adaptado de ESRI ArcGIS 10.2 Desktop Help.

3. Resultados e discussão

3.1 Mapeamento e simulação de cenários

O total de áreas mapeadas com cada base de dados é apresentado na Figura 4. Constatase que, considerando os critérios estabelecidos em lei, a área mapeada é pouco expressiva em todos os MDEs, independentemente do método utilizado para o cálculo da declividade. Para os MDEs IBGE e ASTER, o Método 2 (média dos valores de declividade nas células) resultou em um maior total de área classificada como APPs em topos de morros. No MDE Topodata nenhuma APP foi encontrada em ambos os métodos, levando em conta os critérios definidos em lei. Para o MDE SRTM, ao contrário dos demais, o Método 1 resultou em mais áreas mapeadas.

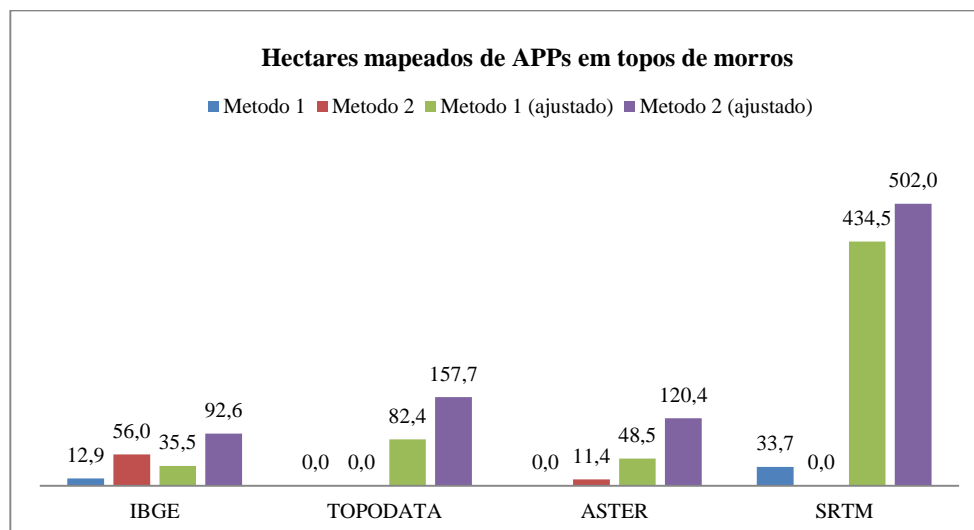


Figura 4 - Total de APPs em topos de morros mapeadas em diferentes modelos digitais de elevação com dois métodos de cálculo da declividade e com valores de declividade ajustados em função da resolução do MDE.

Ao reclassificar a declividade, ajustada em função da resolução dos MDEs, há um expressivo aumento das áreas classificadas como APPs, em ambos os métodos de cálculo da declividade (Figura 4 e Figura 6). Constatase, assim, a propagação da incerteza na representação da declividade e, ainda, a grande

influência do critério da declividade no mapeamento das APPs, enquanto fator limitante para classificação das mesmas.

Destaca-se a grande discrepância do total mapeado com base no MDE SRTM, que ultrapassou os 400 hectares quando os valores de declividade foram ajustados para compensar a resolução do MDE, em ambos os métodos. Esse resultado não era esperado, uma vez que se trata do MDE com resolução mais baixa entre aqueles utilizados, por esse motivo esperava-se encontrar menos APPs em topos de morros no mesmo, dado que os resultados de MDEs com resoluções mais baixas tendem a subestimar a área total de APPs (Catelani et al., (2003), Victoria (2010), Barbarisi et al., (2011)). A razão dessa ocorrência é que, pelo tamanho de célula maior, o modelo SRTM somente representa os pontos de sela mais aprofundados no perfil topográfico (Figura 5), fazendo com que a cota de base dos morros (ponto de sela) se afaste do cume.

Como consequência, há considerável aumento das áreas delimitadas pelo terço superior das elevações, pois morros adjacentes são agrupados como apenas um. Ao ajustar o valor de declividade em função do tamanho de célula do MDE, muitas áreas que anteriormente não eram consideradas passam a ser classificadas como APP e, por possuírem individualmente maior área, levaram a um maior total de área mapeada.

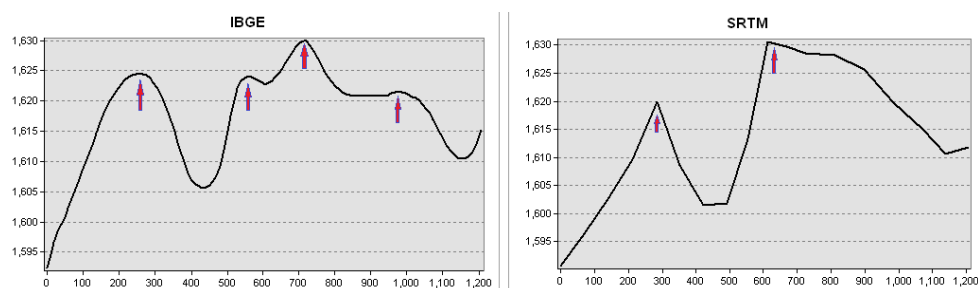


Figura 5 - Ilustração de uma mesma sequência de topos em perfil topográfico, extraídos dos MDEs IBGE e SRTM, com resoluções de 10m e 90m, respectivamente.

Para todas as bases de dados avaliadas, o Método 2 de cálculo da declividade média levou a um maior número de áreas classificadas, quando a mesma foi ajustada em função da resolução do MDE.

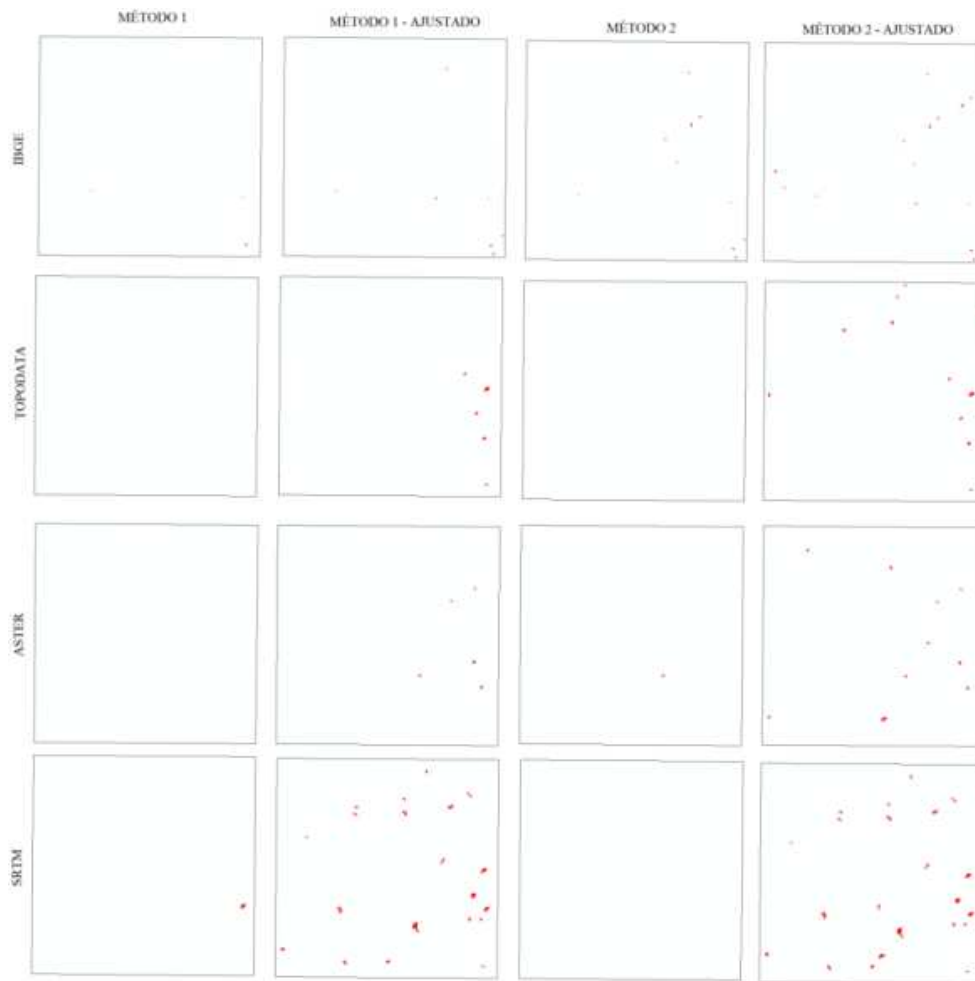


Figura 6 - APPs em topos de morros (em vermelho) mapeadas na área de estudo com os diferentes modelos digitais de elevação.

As estatísticas das áreas mapeadas, com os critérios definidos em lei, são apresentadas na Tabela 1. A maior APP em topo de morro foi mapeada no MDE SRTM e possui 65,8 ha, enquanto a menor área foi mapeada no MDE ASTER e possui 0,1 ha. Ajustar a declividade para compensar a perda de informações pelo tamanho de célula do MDE, não só aumenta o número de áreas classificadas como APP, mas também inclui áreas menores, que antes não eram mapeadas.

O ajuste da declividade em função do tamanho de célula do MDE foi adequado, uma vez que o número total de APPs mapeadas nos diferentes MDEs é mais aproximado com a aplicação dessa técnica. Isto significa que, ao levar em conta a perda de informações nos MDEs de baixa resolução e equilibrar a mesma através de um valor equivalente, para cada resolução, estamos colocando todos os MDEs em maior igualdade, ao atenuar o efeito de escala e resolução em cada um deles. Como resultado, temos mapas mais semelhantes, produzidos por diferentes bases de dados.

Para que uma base de dados tenha escala compatível com o mapeamento, é preciso que a menor área mapeada na mesma seja igual ou maior à área mínima mapeável para sua escala. Considerando os padrões de exatidão cartográfica (PEC) obtidos na presente pesquisa, a área mínima mapeável seria de 1,56 ha para IBGE (1:75.000 na classe B), 2,78 ha para Topodata e ASTER (ambos em 1:100.000 na classe B) e 11,11 ha para SRTM (1:200.000 na classe A). Por essa razão, os MDEs ASTER e SRTM não se adequam aos padrões de cartografia para mapeamento de APPs em topos de morros, para o caso em estudo, pois intentam delimitar áreas que estão além do seu limite mínimo representável em mapa. As menores áreas mapeadas nos MDEs IBGE e Topodata, são maiores do que sua respectiva área mínima mapeável, sendo, portanto, adequadas para o mapeamento de APPs em topos de morro na área de estudo.

Tabela 1 – Estatísticas relativas às áreas mapeadas (em hectares), em cada base de dados, nos dois métodos de cálculo da declividade média considerando os critérios definidos em lei e o valor de declividade média ajustado em função do tamanho de célula do MDE.

	Método 1					Método 1 - ajustado				
	n	Média	Mín.	Max	Desv. Pad.	n	Média	Mín	Máx	Desv. Pad
IBGE	3	4,3	2,3	7,4	2,8	8	4,4	1,5	7,5	2,2
TOPODATA	0	0,0	0,0	0,0	0,0	6	13,7	3,2	31,6	9,9
ASTER	0	0,0	0,0	0,0	0,0	7	6,9	0,1	13,4	5,0
SRTM	1	33,7	33,7	33,7	0,0	22	19,7	0,8	65,8	15,0
	Método 2					Método 2 - ajustado				
	n	Média	Mín.	Max	Desv. Pad.	n	Média	Mín	Máx	Desv. Pad
IBGE	11	5,1	1,5	10,6	2,7	17	5,4	1,5	10,6	2,5
TOPODATA	0	0,0	0,0	0,0	0,0	12	13,1	3,2	31,6	7,3
ASTER	2	5,7	1,3	10,2	6,3	13	9,3	0,1	28,8	7,5
SRTM	0	0,0	0,0	0,0	0,0	26	19,3	0,8	65,8	14,5

Os resultados da simulação de cenários são apresentados na Tabela 2, onde se percebe que o critério da declividade apresenta maior influência no total mapeado em APPs, no sentido que há maiores incrementos de área mapeada quando a declividade média exigida diminui. Por outro lado, a redução da altura exigida aparentemente não confere ganhos significativos em termos de área total mapeada.

Tabela 2 - Resultados da simulação de cenários, em hectares de APPs em topos de morros mapeados nas diferentes bases de dados utilizadas.

Dados Altura (m)	Declividade (graus) - Método 1					Declividade (graus) - Método 2				
	10	15	20	25	Declividade Ajustada	10	15	20	25	Declividade ajustada
ASTER										
50	472,7	251,9	70,6	8,3	116,7	472,7	375,5	168,7	24,0	263,0
60	374,9	226,6	66,3	8,3	112,4	374,9	324,8	163,9	24,0	237,3
70	327,6	204,0	62,2	8,3	100,7	327,6	297,5	148,0	24,0	216,8
80	267,7	173,6	57,3	6,5	87,7	267,7	258,9	123,7	22,2	178,1
90	244,2	166,1	57,3	6,5	87,7	244,2	244,2	123,7	22,2	178,1
100	169,1	113,6	35,1	0,0	48,5	186,4	186,4	71,1	11,4	120,4
IBGE										
50	554,1	314,0	74,4	20,4	46,9	613,7	497,4	211,2	71,5	138,7
60	482,7	289,2	73,3	20,4	46,9	497,8	439,0	204,3	70,4	133,5
70	419,8	257,7	67,1	20,4	43,0	419,8	392,1	179,9	66,5	119,6
80	402,0	239,9	62,3	20,4	43,0	402,0	374,3	166,3	66,5	110,4
90	381,1	230,7	56,4	17,4	40,0	381,1	353,4	160,4	60,5	104,5
100	241,9	197,0	48,6	12,9	35,5	293,9	280,2	139,7	56,0	92,6
SRTM										
50	1045,9	408,2	91,3	37,9	722,5	1135,6	447,7	56,0	0,0	834,4
60	955,4	386,8	85,6	35,4	680,5	1034,4	431,2	56,0	0,0	773,5
70	834,4	331,6	69,9	35,4	582,6	896,1	380,2	51,8	0,0	682,2
80	759,5	307,8	63,4	33,7	532,4	821,3	362,9	48,6	0,0	620,5
90	718,4	283,1	52,7	33,7	500,3	780,1	329,2	48,6	0,0	579,3
100	663,3	258,4	48,6	33,7	434,5	668,2	288,8	48,6	0,0	502,0
TOPODATA										
50	630,3	211,0	48,5	5,9	130,4	740,2	464,0	139,1	4,0	315,3
60	530,6	180,9	46,6	4,0	118,9	592,7	415,0	126,2	4,0	285,8
70	460,1	157,7	44,6	2,0	116,9	509,4	369,9	124,2	2,0	249,8
80	396,6	138,5	39,4	0,0	106,6	396,6	313,0	113,9	0,0	230,6
90	355,2	114,2	34,9	0,0	89,4	355,2	271,6	96,7	0,0	195,0
100	262,6	97,4	34,9	0,0	82,4	287,2	215,4	89,7	0,0	157,7

Os resultados do mapeamento foram submetidos à análise de variância, considerando a declividade e a altura, exigidos em lei, como fatores e a área total mapeada como variável de resposta. Com essa abordagem, buscou-se responder a seguinte questão: qual critério de mapeamento (altura ou declividade) apresenta maior influência sobre o total mapeado em APPs de topos de morros? O resultado da ANOVA é apresentada na Tabela 3, para os dois métodos de cálculo da declividade média.

Tabela 3 - Análise de variância da área total mapeada, pelos critérios de altura e declividade média. GL: graus de liberdade, SQ: soma dos quadrados, QM: quadrados médios.

Método 1					
Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F	Pr(>F)
Altura	5	165273	33055	2.312	0.0506
Declividade	3	3454258	1151419	80.537	<2e-16***
Resíduos	87	1243819	14297		
Método 2					
Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F	Pr(>F)
Altura	5	271132	54226	3.173	0.0112*
Declividade	3	3748788	1249596	73.115	<2e-16***
Resíduos	87	1486903	17091		

A declividade média dos morros é o fator mais limitante, enquanto esse fator foi significativo a 99% de probabilidade nos dois métodos de delimitação. No método 1 de cálculo da declividade, o critério de altura não foi um fator significativo. Isso porque, nesse método, a limitação dada pela declividade é tamanha que, mesmo reduzindo a altura exigida, não haveria ganhos significativos em área protegida. Embora nos resultados com o método 2 haja maior influência do critério de altura (indicando que há mais equilíbrio entre os dois critérios), a declividade também apresenta maior influência.

Em síntese, quaisquer alterações nos critérios para delimitação de APPs em topos de morros, que visem o aumento da área protegida, devem priorizar que o valor da declividade média exigida seja alterado, reduzindo o valor exigido para que uma área seja considerada como APP. Além disso, nessa situação, é mais adequado que o cálculo da declividade seja feito pelo Método 2 (média do valor das células), por resultar em maior área legalmente protegida.

3.2 Erros de estimativa da altura nos morros

O erro de estimativa no cálculo da altura de cada morro foi mensurado, subtraindo-se o valor de altura estimado no MDE usado para o mapeamento, com aquele obtido na referência (LIDAR). Para tal, foi considerada a área de base do morro delimitada em cada MDE. Os resultados são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Estatísticas dos erros de mensuração na altura dos morros nos diferentes modelos digitais de elevação.

MDE	n	Média	Desv. Pad.	Mínimo	Máximo
IBGE	473	-11,8	12,0	-49	45
TOPODATA	165	-37,8	24,6	-83	110
ASTER	292	-15,6	17,7	-101	108
SRTM	72	-32,6	48,2	-97	174

Nos MDEs utilizados há tendência de subestimar a altura dos morros, uma vez que o valor médio é negativo para todos eles. O MDE produzido com os dados IBGE apresentou melhores resultados, com valor médio de erro mais próximo de zero e menor desvio padrão. O MDE Topodata apresentou maior tendência de subestimativa na altura dos morros, com valor médio -37,8 m. Essa tendência explica, em parte, o fato de que nenhuma área foi mapeada com essa base de dados, considerando os critérios definidos em lei.

Pelo histograma dos erros de estimativa da altura dos morros (Figura 7), percebe-se que os erros estão concentrados à esquerda da distribuição, com valores negativos. O número total de morros mapeados pelo MDE SRTM é consideravelmente inferior aos demais, o que é decorrência da resolução do mesmo, que leva a um agrupamento de morros vizinhos pela indistinção dos mesmos, em razão da omissão de pontos de sela menos “aprofundados” no perfil topográfico.

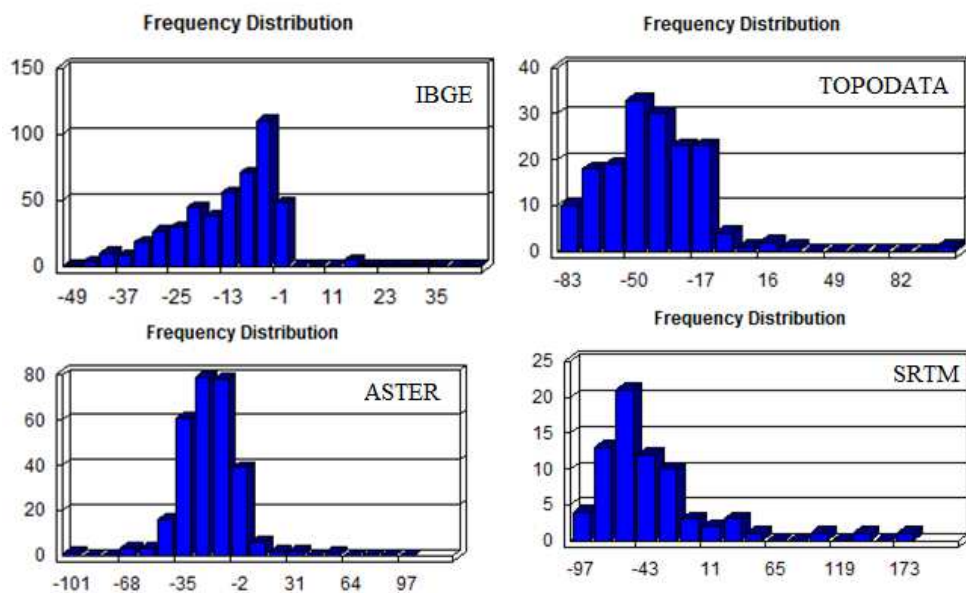


Figura 7 - Distribuição dos erros de estimativa na altura dos morros.

No caso específico do mapeamento de APPs em topos de morros, é desejável que, nas áreas definidas como base do morro (dada pela cota do ponto de sela mais próximo da elevação), haja agrupamentos de valores baixos de erros. Os valores de desvios de estimativa dos MDEs foram utilizados para a análise de agrupamento pelo índice I local de Moran (Anselin, 1995). Assim, foram verificados os tipos de clusters localizados nos morros, através da contagem de cada um deles nos polígonos que definem as bases dos morros. A contagem foi convertida em valores percentuais (Tabela 5).

Tabela 5 - Percentuais de tipos de clusters presentes nos morros, obtidos pela contagem de pontos dentro do polígono que define a base do morro.

Tipo de Cluster	%			
	IBGE	TOPODATA	ASTER	SRTM
Não significativo	52,56	67,35	57,68	66,89
High-High	16,83	7,18	10,97	8,55
High-Low	0,00	0,03	0,18	0,55
Low-High	0,02	0,39	0,31	2,19
Low-Low	30,59	25,19	30,86	21,82

Em todas as bases de dados, há predominância de agrupamentos não significativos de valores de erros nas regiões definidas como base dos morros. Isto é, valores que ocupam posições centrais na curva de distribuição e estão próximos espacialmente. O tipo de cluster low-low (valores baixos de erros) ocupa a segunda posição, em valores relativos. O agrupamento de valores altos de erro foi mais expressivo nos dados do IBGE (16,83% dos clusters) e menor nos dados Topodata, representando 7,18% dos clusters. É possível que o maior valor observado para os dados IBGE esteja relacionado com a baixa densidade de informações (curvas de nível por área) nos cumes dos morros, os quais são moderadamente aplainados na área de estudo. Observa-se de maneira geral que, proporcionalmente, há pouca concentração de valores altos de erros nos morros (cluster high-high). Todavia, há uma tendência geral de subestimar a altura dos mesmos, pois, embora os erros de estimativa não se diferenciem estatisticamente da média regional, são suficientes para alterar substancialmente a altura estimada dos morros.

O padrão de subestimativa na altura dos morros sugere que é necessário estabelecer um padrão de ajuste para os modelos digitais de elevação, visto que isso leva à uma redução no total mapeado como APP em topos de morros. O erro médio de estimativa na altura dos morros é superior a 10 metros em todos os MDEs utilizados.

As conclusões aqui obtidas não podem ser extrapoladas, uma vez que são intimamente ligadas às características do relevo presente na área de estudo. Análises semelhantes devem ser feitas futuramente, para condições geomorfológicas diferentes, para verificar se há um padrão para a distribuição do erro de estimativa da altura nos topos de morros.

3.3 Ajustes nos modelos digitais de declividade para o mapeamento de áreas de preservação permanente.

Diante da perda de informações nos modelos digitais de declividade (MDD) de baixa resolução, quais medidas deveriam ser tomadas para torná-los

aptos para o mapeamento de APPs? A baixa correlação dos dados não permite ajustar uma regressão para corrigir os valores estimados em um modelo digital de declividade com baixa resolução. Entretanto, é possível definir, na reclassificação dos MDDs um “ponto de corte” para cada resolução, que equivale a mesma área mapeada no que consideramos a verdade de campo. Isto é, se em um modelo de declividade de alta resolução, reclassificamos células com valor acima de 25° e obtivemos uma área “h”, essa mesma área só será mapeada corretamente em um modelo de baixa resolução, caso a reclassificação seja feita considerando um valor mais baixo de declividade. Ou seja, na medida em que o tamanho de célula aumenta, diminui o valor de declividade que deve ser considerado para mapear uma área equivalente (Figura 8). Baseando-se nessa curva, para mapear áreas com declividades acima de 25° em campo, o valor a ser considerado em MDEs com 10, 30 e 90 metros de resolução seriam, respectivamente: 21,30°; 17,48° e 12,40°.

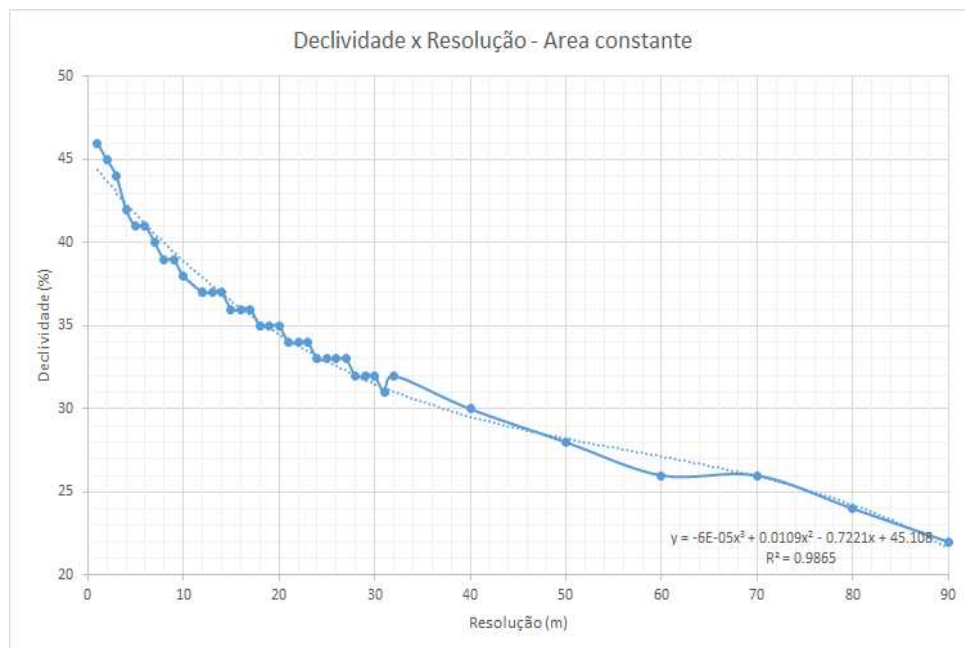


Figura 8 - Valores de declividade (em percentagem) para mapear áreas equivalentes, em função da resolução do modelo digital de declividade. Nota: 45% equivalem a aproximadamente 25° de declividade.

Para confirmar a viabilidade desse método de correção, os modelos digitais de declividade foram reclassificados pelo valor ajustado da declividade, em relação ao tamanho de célula dos mesmos. Assim, espera-se que em regiões com características semelhantes àquelas da área de estudo, seja possível alcançar resultados aproximados (em termos de área mapeada), utilizando modelos de resoluções diferentes.

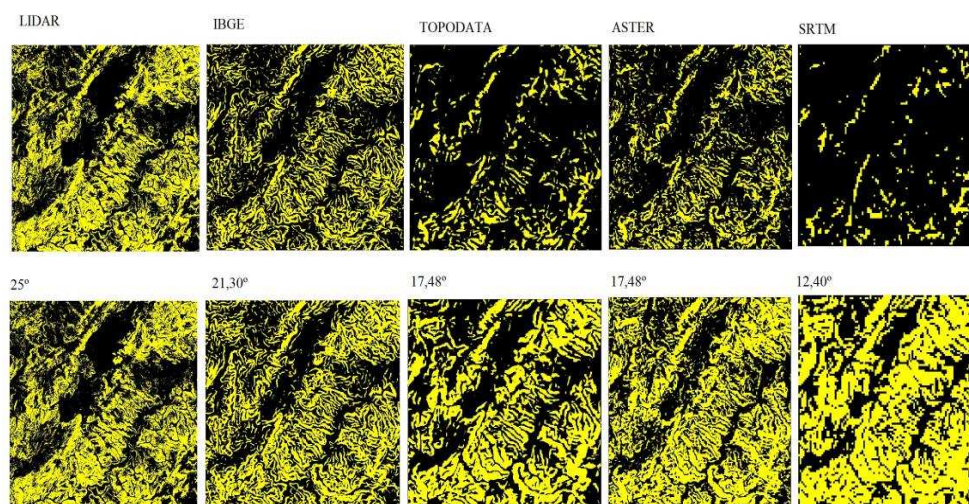


Figura 9 - Em amarelo, áreas com declividade superior a 25° (acima) e com declividade reclassificada pelo valor ajustado em relação ao tamanho de célula (abaixo), correspondente a 25° na referência.

Conforme o exposto na Figura 9, o uso do método é condizente, uma vez que as áreas obtidas na reclassificação ajustada são muito semelhantes aquelas presentes no modelo usado como referência. Como previsto, as áreas com declividade acima de 25° são bastante reduzidas nos modelos de declividade com resolução mais baixa, conseqüentemente eles não podem ser considerados aptos para o mapeamento de APPs em topos de morros, sem um ajuste para compensar o efeito de sua baixa resolução. Embora os modelos Topodata e ASTER possuam a mesma resolução, o primeiro apresenta menos áreas com declividade superior a 25 graus. Isso é explicado pela ausência das informações na sua fonte de dados (SRTM), que não poderiam ser recriadas pelos métodos de correção ou interpolação.

3.4 Escala de mapeamento e pontos de sela

Como previsto, há redução do número de pontos de sela mapeados com o aumento do tamanho da célula do MDE usado no mapeamento (Tabela 6), que é acompanhada pelo aumento na altura média dos morros, uma vez que os pontos de sela se distanciam dos topos e assumem cotas mais baixas do relevo, resultando em maiores alturas. Nos MDEs de resolução muito alta (5 e 15 metros), a média da altura dos morros ficou abaixo de 10 metros, o que aponta a existência de muitos pontos de sela indevidamente mapeados. Na resolução mais baixa (90m), apenas 72 pontos de sela foram mapeados e a altura média dos mesmos é de 26,4m. Esse resultado explica o porquê de mais áreas mapeadas com os dados SRTM.

Tabela 6 - Número de pontos de sela e altura dos morros definidos por eles, mapeados com modelos digitais de elevação com tamanhos de células crescentes. Escala equivalente calculada pela relação $Escala = Resolução/0,0002$.

Tamanho de célula (m. m)	Escala equivalente	Núm. de pontos de sela	Altura dos morros (m)		IC
			Média	Desv. Pad.	
5	25.000	3537	2,2	5	2,1
15	75.000	540	7,6	13,2	6,4
30	150.000	266	13,8	17,9	11,7
45	225.000	163	18,1	24,2	14,4
60	300.000	109	21,5	32,1	15,4
75	375.000	87	25,9	33,9	18,7
90	450.000	72	26,4	34,2	18,5

Percebe-se que o número de pontos de sela resultantes no mapeamento com um MDE de alta resolução (5x5m) é muito destoante dos demais, o que reflete uma incompatibilidade dos dados de alta resolução com a escala do fenômeno estudado.

Embora soe como um paradoxo, essa situação ratifica a necessidade de adequar o uso de modelos digitais de elevação para o seu propósito em específico. No presente caso, os modelos de resolução muito alta, embora mais precisos, são inadequados para o mapeamento porque a expressão do microrrelevo neles é muito forte, levando a uma subdivisão dos domínios das elevações que não condiz com a realidade geomorfológica do local, tampouco com o que se poderia julgar adequado, mediante as funções esperadas para uma área de preservação permanente em topo de morro.

Dependendo da escala dos mapas utilizados, pontos de sela presentes na paisagem podem ou não ser representados, uma vez que somente aqueles cujo “aprofundamento” no perfil topográfico é igual superior à equidistância vertical das curvas de nível serão exibidos. A Figura 10 traz a representação de um mesmo local em três bases de dados diferentes, em diferentes escalas. A base do topo representado por “t¹” é a cota do ponto de sela A, nos mapas com escalas menores (I e II). Todavia, em uma representação mais detalhada (III), a base do morro “t¹” é o ponto de sela “B”, cujo aparecimento leva à divisão do morro e o surgimento de um segundo topo, “t²”, que por sua vez também terá como ponto de sela o ponto “B”, que está mais próximo de seu topo. Fica evidente que a escala de mapeamento influencia completamente os resultados obtidos, bem como cada base de dados representa o relevo com detalhes distintos.

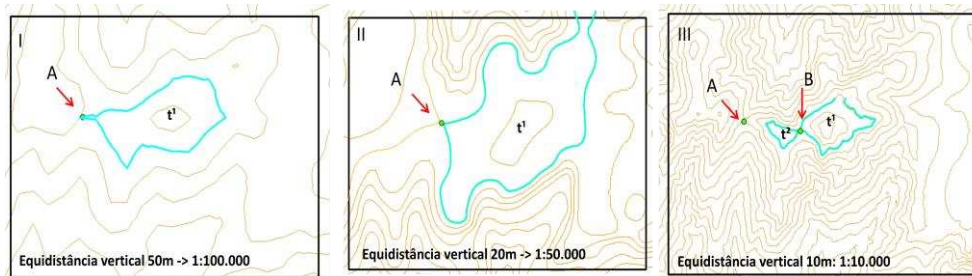


Figura 10 - Representação de pontos de sela em diferentes mapas e escalas de mapeamento. I) equidistância vertical 50m, dados SRTM; II) equidistância vertical 20m, dados ASTER; e, III) equidistância vertical 10m, dados LIDAR

Com MDEs de tamanho de célula a partir de 30 metros, o número de pontos de sela mapeados não se alterou significativamente (Figura 11), o que indica que essa resolução pode ser um limite mínimo utilizado no mapeamento digital, sendo equivalente a escala 1:150.000.

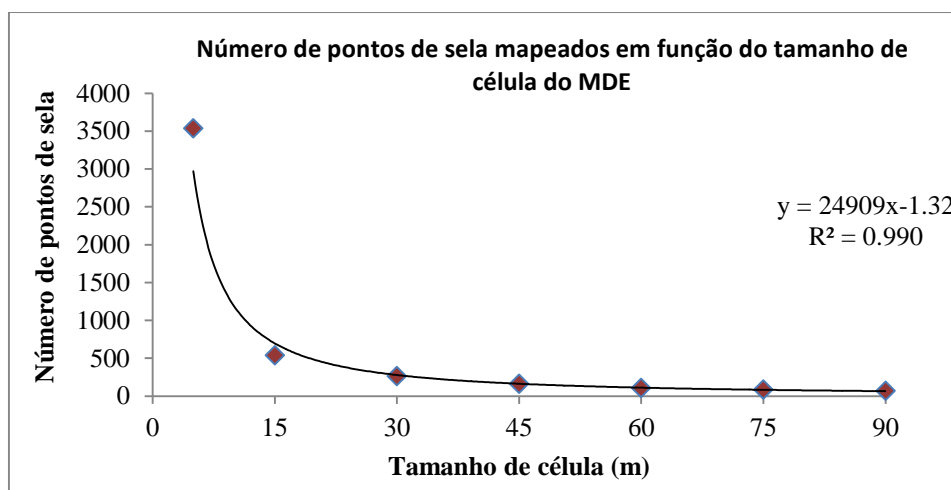


Figura 11 - Número de pontos de sela mapeados em função do tamanho da célula do modelo digital de elevação utilizado.

Com o aumento do tamanho de célula, há também aumento do perímetro dos morros, o que significa que, individualmente, eles são mais extensos em resoluções mais baixas. A área total também aumenta até a resolução de 60m, a partir da qual o pequeno número de morros faz com que a área total comece a decrescer (Figura 12). São apresentados os polígonos que definem as bases dos morros (Figura 13), resultantes de mapeamentos executados com MDEs de tamanho de célula em ordem crescente. As imagens confirmam visualmente que a resolução do MDE utilizado no mapeamento leva a resultados muito distintos.

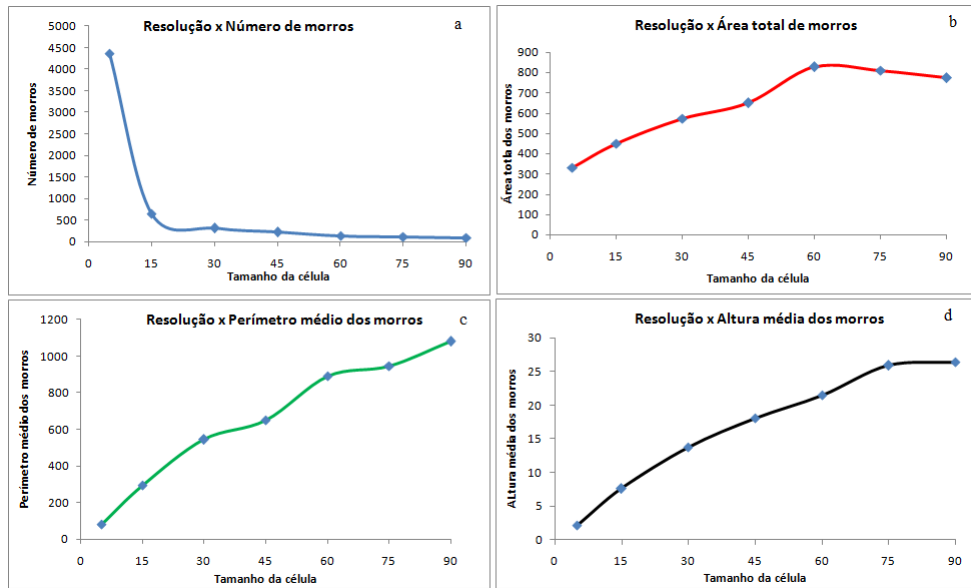


Figura 12 - Relação entre a resolução do modelo digital de elevação e: a) número de morros, b) área total dos morros, c) perímetro médio dos morros e, d) altura média dos morros.

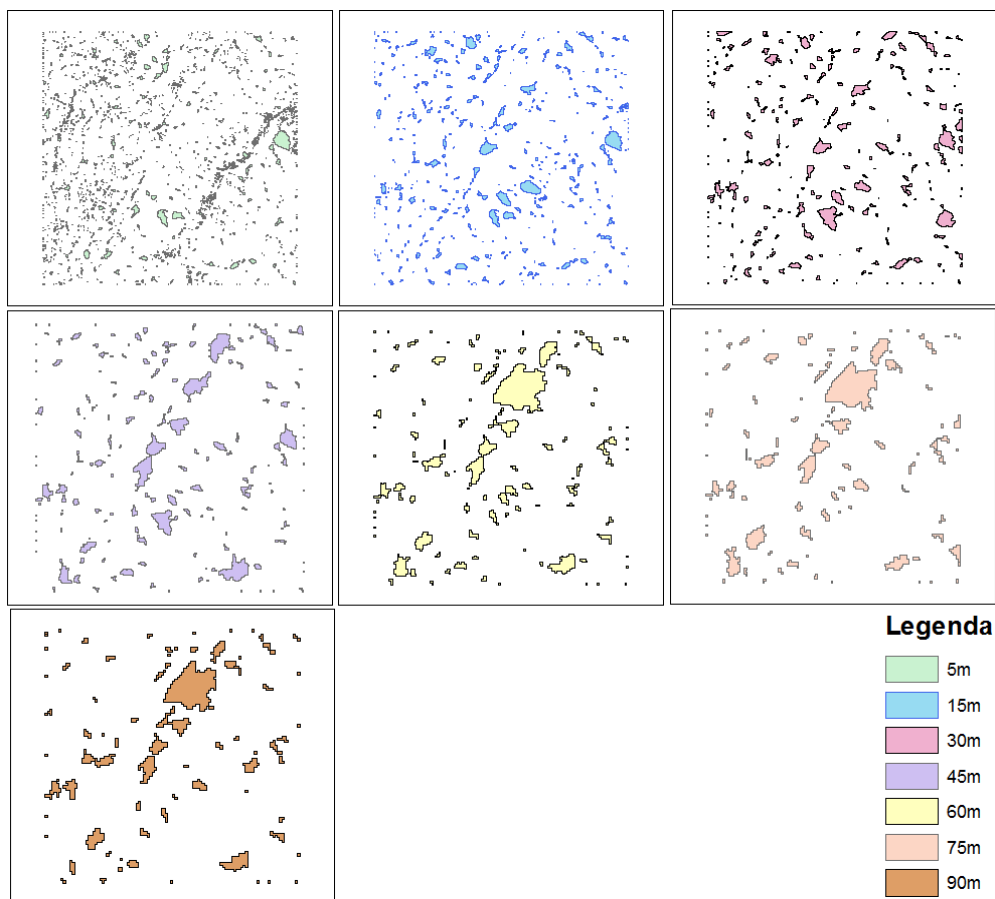


Figura 13 - Áreas definidas como bases dos morros, mapeadas através de MDEs com diferentes resoluções espaciais.

Os resultados da análise geoestatística, pelo método do vizinho mais próximo, são apresentados na Tabela 7. Observa-se que o padrão de distribuição espacial dos pontos de sela mapeados é distinto nas diferentes resoluções, o que

pode representar mais um critério para definição da escala de mapeamento. Com resoluções espaciais muito altas (5m e 15m), os pontos de sela mapeados apresentam padrão de distribuição espacial agrupado. Esse padrão passa a ser aleatório nos mapeamentos realizados com MDEs de resolução entre 30m e 75m. Na menor resolução testada (90m), o padrão de distribuição é disperso.

Tabela 7 - Resultados da análise de padrão de distribuição dos pontos de sela pelo método do vizinho mais próximo.

Tamanho de célula (m. m)	Escala equivalente	Dist. média observada	Dist. média esperada	z-score	p valor	Padrão de distribuição
5	1: 25.000	48,58	81,4	-47,4	0,00	agrupado
15	1: 75.000	167,23	207,49	-9,0	0,00	agrupado
30	1: 150.000	289,36	300,57	-1,2	0,23	aleatório
45	1: 225.000	360,63	371,83	-0,8	0,44	aleatório
60	1: 300.000	471,9	472,69	0,0	0,97	aleatório
75	1: 375.000	520,3	515,96	0,2	0,87	aleatório
90	1: 450.000	640,18	573,82	1,92	0,05	disperso

A mudança de padrões de distribuição dos pontos de sela espacial reflete a importância da escala no mapeamento de APPs em topos de morros. O padrão agrupado, observado nos resultados de MDEs com resolução mais alta, não constitui uma condição adequada, pois leva a uma subdivisão inconsistente dos morros e, conseqüentemente, a redução da área total mapeada. Por outro lado, o padrão disperso observado no MDE com resolução mais baixa, indica que a partir dessa escala estamos agrupando muitos domínios, que poderiam ser considerados separadamente.

A escala de mapeamento influencia no número e na localização dos pontos de sela, identificados numa determinada cena. Em resoluções mais baixas somente os pontos de sela mais marcantes na paisagem são mantidos, levando a um agrupamento de morros que, em resoluções mais altas, seriam identificados separadamente. Se, por um lado, em resoluções muito altas a expressão do microrrelevo leva ao aparecimento de falsos pontos de sela (i.e, aqueles que não possuem sentido prático no mapeamento) e resultam em áreas muito pequenas, por outro, ao utilizar modelos digitais de elevação com baixa resolução há um significativo aumento da área resultante como APP em topos de morros, o que tampouco é condizente com a realidade rural, no sentido que poucas propriedades receberiam a incumbência de preservar grandes áreas.

Assim, o cenário ideal seria aquele em que as APPs em topos de morros tivessem um tamanho adequado e uma distribuição espacial que favorecesse sua conectividade com as demais áreas protegidas. Contudo, apesar da evidente

importância na escala de mapeamento, o novo Código Florestal em absoluto não aborda o assunto, o que representa grande lacuna e tem causado insegurança jurídica na questão. Se a escala dos dados utilizados é determinante no resultado do mapeamento, é fundamental que ela seja estabelecida em lei. Mesmo no mapeamento feito em campo, considerar ou não uma depressão como ponto de sela é questão bastante subjetiva, cujo critério fica a cargo do técnico envolvido.

4. Conclusões

O mapeamento digital de Áreas de Preservação Permanente em topos de morros envolve questões técnicas de grande importância, que não são abordadas na Lei 12651/2012. Destacam-se dois pontos principais, cujo não estabelecimento de critérios abre grande margem para subjetividade na interpretação da lei e sua aplicação prática. Em primeiro lugar, tem-se a necessidade da definição do método para cálculo da declividade média, haja vista a divergência de resultados nos dois métodos utilizados no estudo. Em segundo lugar, é fundamental que uma escala adequada de mapeamento seja definida. Os resultados mostram que a escala de mapeamento, dada pela resolução dos MDES, é definidora dos resultados.

Segundo observado na simulação de cenários, ainda que as exigências de declividade média e altura para delimitação de APPs em topos de morros sejam reduzidas, as áreas resultantes ocupam pouca fração do território. Mesmo na simulação em que se encontrou maior área mapeada, 1135,6 ha, a área total corresponde a somente 1,13% da paisagem. Por análise visual dos mapas gerados percebe-se também um forte isolamento geográfico dos locais classificados como APPs em topos de morros, o que pode comprometer sua função enquanto provedor de fluxos gênicos na paisagem. Em trabalhos futuros, recomenda-se avaliar o grau de conectividade dessa classe de APP com as demais.

As diferenças dos resultados entre os MDEs utilizados, bem como entre métodos de cálculo da declividade média, mostram que há necessidade de uma padronização para o mapeamento automático de APPs em topos de morros, de forma a definir os dados topográficos e o método de mensuração da declividade média a serem utilizados. Os modelos digitais de elevação possuem papel importante, pois guardam consigo efeitos de escala e incertezas provenientes do seu método de obtenção e processamento de dados. Conforme o apresentado, MDEs de baixa resolução podem levar a mais áreas mapeadas, uma vez que tendem a agrupar morros adjacentes, aumentando a área do terço superior dos mesmos e também sua altura.

Apresentou-se uma possível forma de lidar com imprecisão dos modelos digitais de declividade, através da determinação dos valores de declividade em razão do seu tamanho de célula, na ocasião da reclassificação dos modelos. Ainda que a análise visual dos mapas indique bons resultados, é necessário, contudo, que esse método seja avaliado futuramente de forma mais criteriosa.

A resolução dos dados utilizados para o mapeamento determina o número e o padrão de distribuição espacial dos pontos de sela. O número alto resultante nos mapeamentos com dados de alta resolução, não condizem com a realidade prática da delimitação de áreas de preservação permanente, por essa razão os MDEs de tamanho de célula muito pequeno devem ser evitados. Um padrão de distribuição aleatória foi constatada nos mapeamentos executados com MDEs de resoluções entre 30 e 75 metros, equivalentes a escalas 1:150.000 e 1:375.000. O número e a distribuição espacial dos pontos de sela mapeados podem servir como base para o estabelecimento de um critério, para definição da escala de mapeamento automático de APPs em topos de morros.

CONSIDERAÇÕES GERAIS

Do exposto no presente trabalho, conclui-se:

a) As Áreas de Preservação Permanente em topos de morros possuem grande importância para a manutenção do equilíbrio ambiental. Entretanto, apesar da evolução histórica da Lei, a delimitação dessas áreas ainda consiste em um desafio para os envolvidos.

b) É necessário dar maior atenção à validação dos MDEs. Os resultados mostram a importância do uso de um tamanho amostral adequado para a validação. Para a área de estudo do presente trabalho, o uso de 5,5 pontos/km² foi suficiente para validar os MDEs IBGE e ASTER GDEM, a 90% de confiabilidade.

c) Os critérios utilizados para avaliar os MDEs foram: RMSE, EM, a normalidade dos erros, a distribuição espacial dos erros de estimativa, a propagação dos erros pelos derivativos da altitude e o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC). Em todos esses, os dados topográficos do IBGE, na escala 1:50.000, representados através de um MDE com 10m de resolução espacial obtiveram os melhores resultados.

d) Há acentuada perda de informações nos derivativos da altitude (declividade, direção da vertente e curvatura), representada pela baixa correlação entre os resultados gerados pelos MDEs e a base de referência. O tamanho de célula foi visto como um limitante na qualidade dos MDEs.

e) Não é recomendável utilizar de interpoladores para refinar MDEs, visto que as matrizes criadas com resoluções mais apuradas não apresentaram precisão melhor do que os modelos originais. Além disso, as expressões de diferentes artefatos, gerados pelos interpoladores, podem prejudicar seriamente as análises posteriores. Na interpolação de pontos a partir das curvas de nível, o interpolador Topo To Raster mostrou o melhor desempenho.

f) Uma metodologia para o mapeamento automático de APPs em topos de morros foi desenvolvida com sucesso, em ambiente Model Builder do ArcGIS 10.2, permitindo a execução de mapeamentos sistemáticos com grande celeridade.

g) As APPs em topos de morros foram praticamente extintas com o novo Código Florestal. Além disso, os erros e incertezas presentes nos MDEs utilizados para o mapeamento, bem como as subjetividades da Lei, podem fazer com que a área protegida seja ainda menor.

h) Sugere-se que, para padronização da metodologia, seja utilizado o método de cálculo da declividade onde os valores são obtidos pelo modelo digital de

declividade e o valor médio das células em cada morro seja calculado, visto que o mesmo levou a uma maior área legalmente protegida.

i) A escala de mapeamento é determinante nos resultados. É urgente que a Lei defina uma referência de forma explícita. Modelos digitais de elevação com resolução muito alta (abaixo de 30m) não são adequados para o mapeamento, bem como aqueles com resolução baixa (acima de 90m). Os resultados apresentados no trabalho podem nortear a definição de uma escala de mapeamento para as APPs em topos de morros.

j) Sugerimos que, em trabalhos futuros, seja avaliada a conectividade entre as APPs em topos de morros e as demais áreas protegidas na paisagem. Pelo observado, as poucas APPs em topos de morros que ainda existem, constituem áreas reduzidas e isoladas geograficamente, o que compromete seu papel enquanto Área de Preservação Permanente, definida em Lei.

BIBLIOGRAFIA

ALBANI, M., & KLINKENBERG, B. A spatial filter for the removal of striping artifacts in digital elevation models. *Photogrammetric engineering & remote sensing*, 69(7): 755-765, 2003.

ALVARES, R. P., & HENKES, J. A. Áreas de Preservação Permanente em encostas: Delimitação através de Dados SRTM. *Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, 1(1):198, 2012.

ALVES, E. D. L. & VECCHIA, F. A. S. Análise de diferentes métodos de interpolação para a precipitação pluvial no Estado de Goiás. *Acta Scientiarum. Human and Social Sciences*, 33(2):193-197, 2011.

AGUILAR, F. J., MILLS, J. P., DELGADO, J., AGUILAR, M. A., NEGREIROS, J. G., & PÉREZ, J. L. Modelling vertical error in LiDAR-derived digital elevation models. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing.*, 65(1):103-110, 2010.

ANSELIN, L. Local indicators of spatial association— LISA. *Geographical analysis.*, 27(2):93-115, 1995.

BANCO MUNDIAL. Integrated Metropolitan Planning: A Case for DRM in the State of Rio de Janeiro. *Insights in DRM*, 2014. <http://www-wds.worldbank.org/> consultado em novembro de 2015.

BARBARISI, B. F., DE MORAES, F. M., TOMASIELLO, D. B., ORTIZ, M. J., & DE MORAES, A. R.. Comparação entre diferentes escalas de mapeamento de APP de Topo de Morro. In: *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO*, 15, 2011. Anais. p.1614-1619. 2011.

BARROS, R. S. D. Avaliação da altimetria de modelos digitais de elevação obtidos a partir de sensores orbitais. *Anuário do Instituto de Geociências.*, 29(2):239-240, 2006.

BORGES, L. A. C. Aspectos técnicos e legais que fundamentam o estabelecimento das áreas de preservação permanente (APP). Lavras, MG, Universidade Federal de Lavras, 2008. 193 p. (Tese de Doutorado).

BRASIL. Lei nº 4.771, de 15 de setembro de 1965. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF (1965). http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L4771.htm, consultado em setembro de 2014.

BRASIL. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF (1981). http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm, consultado em novembro de 2014.

BRASIL. Lei nº 8.171, de 17 de janeiro de 1991. Diário Oficial da União, Brasília, DF (1991). http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l8171.htm, consultado em setembro de 2014.

BRASIL. Lei nº 11.428, de 22 de dezembro de 2006. Diário Oficial da União, Brasília, DF (2006). http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2006/lei/l11428.htm, consultado em setembro de 2014.

BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Diário Oficial da União, Brasília, DF (2012). http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12651.htm, consultado em setembro de 2014.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. Secretaria Nacional de Defesa Civil. Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres. Anuário brasileiro de desastres naturais: 2012. 84 p. Brasília: CENAD, 2012

BRASIL. Decreto De 13 De Outubro De 2014. Diário Oficial da União, Brasília, DF (2014). http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2014/Dsn/Dsn14013.htm, consultado em dezembro de 2014.

BEHRENDT, R. Introduction to LiDAR and forestry, part 1: a powerful new 3D tool for resource managers. *The Forestry Source.*, p.14-15, 2012.

CARLISLE, B. H. Modelling the spatial distribution of DEM error. *Transactions in GIS*, 9(4):521-540, 2005.

CARVALHO, J. R. P.; VIEIRA, S. R. & GREGO, C. R. Comparação de métodos para ajuste de modelos de semivariograma da precipitação pluvial anual. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental.*, 13(4):443-448, 2009.

CARVALHO FILHO, A., CURTI, N., & SHINZATO, E. Relações solo-paisagem no Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais. *Pesquisa Agropecuária Brasileira.*, 45(8):903-916, 2010.

CATELANI, C. D. S., BATISTA, G. T., & PEREIRA, W. F. Adequação do uso da terra em função da legislação ambiental. In: *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO*, 12, 2003. Anais. 559-566, 2003.

CHAGAS, C. S., FERNANDES FILHO, E. I., VIEIRA, C. A. O., ERNESTO, C., SCHAEFER, G. R., & DE CARVALHO JÚNIOR, W. Atributos topográficos e dados do Landsat7 no mapeamento digital de solos com uso de redes neurais. *Pesquisa agropecuária Brasileira.*, 45(5):497-507, 2010.

CINQUINI, J. A.; MORAES, J. F. L. & COELHO, R. M. Avaliação de modelos digital de elevação para aplicação em mapeamento digital de solos da região do município de

Quatá/SP. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOPROCESSAMENTO E SENSORIAMENTO REMOTO – GEONORDESTE, Aracaju, 2014. Anais. Aracaju, Brasil, 2014. p. 18-21.

COSTA, C. A. G., SANTOS, A. T, ANDRADE, E. M., MACÍLIO, A., LUCENA, P., & CASTRO, M. A. H. Análise da influência vegetacional na altimetria dos dados SRTM em bacias hidrográficas no semiárido. *Ciência Agronômica.*, 41(02):222-230, 2010.

COUTINHO, M. P. O Código Florestal Atual (Lei Federal nº 12.651/2012) e suas implicações na prevenção de desastres naturais. *Sustentabilidade em Debate.*, 4(2):237-256, 2013

CRUZ, C.A.G. & FEIO, R.N. Endemismos em anfíbios em áreas de altitude na Mata Atlântica no sudeste do Brasil. In: *HERPETOLOGIA NO BRASIL, II*, 2007. Sociedade Brasileira de Herpetologia, Belo Horizonte, p.117-126, 2007.

DARNELL, A. R., TATE, N. J., & BRUNSDON, C. Improving user assessment of error implications in digital elevation models. *Computers, Environment and Urban Systems.*, 32(4):268-277, 2008.

DEUS, B. V.; ZEILHOFER, P.; ARAUJO, G. C. & SANTOS, A. S. L. Interpolação pluviométrica na Bacia do Alto e Médio Rio Teles Pires: uma análise de séries históricas e interpoladores. In: *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO*, 3., 2010, Recife. Anais. Recife: UFPE. p.1-7, 2010.

EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Súmula da 10ª Reunião Técnica de Levantamento de Solos. Rio de Janeiro, 83p, 1979.

ENDRENY, T. A. & WOOD, E. F. Representing elevation uncertainty in runoff modelling and flowpath mapping. *Hydrological Processes.*, 15(12):2223-2236, 2001.

ERDOGAN, S. A comparison of interpolation methods for producing digital elevation models at the field scale. *Earth surface processes and landforms.*, 34(3):366-376, 2009.

FELIPE, J. O. *Topo De Morro*. Clube de Autores, 2005.

FISHER, P. Improved modeling of elevation error with geostatistics. *GeoInformatica.*, 2(3):215-233, 1998.

Fisher, P. F. & Tate, N. J. Causes and consequences of error in digital elevation models. *Progress in Physical Geography.*, 30(4):467-489, 2006.

FLORINSKY, I. V. Errors of signal processing in digital terrain modeling. *International Journal of Geographical Information Science.*, 16(5):475-501, 2002.

- FLORINSKY, I. V. Digital terrain analysis in soil science and geology. Academic Press, 2011.
- FRANCELINO, M. R. & SILVA, J. A. Impacto da inclinação média na delimitação de área de preservação permanente. *Floresta e Ambiente.*, 21(4):441-448, 2014.
- FREITAS, A. V. L. Impactos potenciais das mudanças propostas no Código Florestal Brasileiro sobre as borboletas. *Biota Neotropica.*, 10(4):24-33, 2010.
- GALLARDO, A. Geostadística. *Revista Ecosistemas.*, Norteamérica, 15, 2007.
- GALETTI, M., PARDINI, R., DUARTE, J. M. B., SILVA, V. D., ROSSI, A., & PERES, C. A. Mudanças no Código Florestal e seu impacto na ecologia e diversidade dos mamíferos no Brasil. *Biota Neotropica*, 10(4):47-52, 2010.
- GAO, J. Resolution and accuracy of terrain representation by grid DEMs at a micro-scale. *International Journal of Geographical Information Science.*, 11(2):199-212, 1997.
- GASPARINI, K. A. C., LYRA, G. B., FRANCELINO, M. R., DELGADO, R. C., DE OLIVEIRA JUNIOR, J. F., & FACCO, A. G. Técnicas de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto Aplicadas na Identificação de Conflitos do Uso da Terra em Seropédica-RJ. *Floresta e Ambiente.*, 20(3):296-306, 2013.
- GEMMER, M.; BECKER, S.; JIANG, T. Observed monthly precipitation trends in China 1951–2002. *Theoretical and applied climatology.*, 77(1-2):39-45, 2004.
- GIACOMIN, G., CARVALHO, M. B., SANTOS, A. P., MEDEIROS, N. G., & FERRAZ, A. S. Análise comparativa entre métodos interpoladores de modelos de superfícies. *Revista Brasileira de Cartografia.*, 6(66/6), 2014.
- GOROKHOVICH, Y.; VOUSTIANIOUK, A. Accuracy assessment of the processed SRTM-based elevation data by CGIAR using field data from USA and Thailand and its relation to the terrain characteristics. *Remote Sensing of Environment*, 104(4):409-415, 2006.
- GRAFF J. V. de; SIDLE, R. C.; AHMAD, R. & SCATENA, F. N. Recognizing the importance of tropical forests in limiting rainfall-induced debris flows. *Environ Earth Sci*, 67:1225-1235, 2012.
- GUO, Q., LI, W., YU, H., & ALVAREZ, O. Effects of topographic variability and lidar sampling density on several DEM interpolation methods. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing.*, 76(6):701-712, 2010.
- HODGSON, M. E. & BRESNAHAN, P. Accuracy of Airborne Lidar-Derived Elevation. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing.*, 70(3):331-339, 2004.

HÖHLE, J., & HÖHLE, M. Accuracy assessment of digital elevation models by means of robust statistical methods. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing.*, 64(4): 398-406, 2009.

HOLMES, K. W., CHADWICK, O. A., & KYRIAKIDIS, P. C. Error in a USGS 30-meter digital elevation model and its impact on terrain modeling. *Journal of Hydrology.*, 233(1): 154-173, 2000.

HOTT, M. C.; GUIMARÃES, M. & MIRANDA, E. E. Um método para a determinação automática de áreas de preservação permanente em topos de morros para o Estado de São Paulo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. Anais. São José dos Campos: INPE, p. 3061-3068, 2005.

HUTCHINSON, M. F. Calculation of hydrologically sound digital elevation models. In: *THIRD INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SPATIAL DATA HANDLING*, August 17-19, Sydney. Proceedings. International Geographical Union, Columbus, Ohio, p. 117-133, 1988.

HUTCHINSON, M. F. A new method for gridding elevation and streamline data with automatic removal of pits. *Journal of Hydrology.*, 106:211-232, 1989.

ISAAKS, E. H., & SRIVASTAVA, R. M. An introduction to applied geostatistics. New York: Oxford university press, 1989.

JACOVINE, L. A. G., CORRÊA, J. B. L., SILVA, M. D., VALVERDE, S. R., FERNANDES FILHO, E. I., COELHO, F. M. G., & PAIVA, H. D. (2008). Quantificação das áreas de preservação permanente e de reserva legal em propriedades da bacia do Rio Pomba-MG. *Revista Árvore.*, 32(2):269-278.

JERRI, A. J., *The Gibbs Phenomenon in Fourier Analysis, Splines and Wavelet Approximation*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1998.

KERSTING, J., CENTENO, J. A. S., MACHADO, A., & PEDRO, P. Filtragem de modelos digitais de superfície derivados de varredura a LASER usando a triangulação de Delaunay. *Série em Ciências Geodésicas*, 5:145-160, 2005

LAMOUNIER, W. L., CARVALHO, V. L. M., SALGADO, A. A. R., & MARENT, B. R. A influência da litologia na distribuição da cobertura vegetal e no uso do solo na Serra do Gandarela, Quadrilátero Ferrífero-MG. *Geografias.*, 6(1):152-165, 2010.

LAMOUNIER, W. L., CARVALHO, V. L. M., & SALGADO, A. A. R. Serra Do Gandarela: possibilidade de ampliação das unidades de conservação no Quadrilátero Ferrífero-MG. *Revista do Departamento de Geografia-USP.*, 22:171-192, 2011.

LUÍS, F. D. A. P. E., DALMOLIN, P. R. S. D., & KLAMT, A. C. D. A. E. A aptidão de uso da terra como base para o planejamento da utilização dos recursos naturais no município de São João do Polêsine-RS. *Ciência Rural.*, 36(1), 2006.

MAZZINI, P. L. F.; SCHETTINI, C. A. F. Avaliação de metodologias de interpolação espacial aplicadas a dados hidrográficos costeiros quase-sinóticos. *Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology.*, 13(1):53-64, 2009.

MEDEIROS, L. C., FERREIRA, N. C., & FERREIRA, L. G. Avaliação de modelos digitais de elevação para delimitação automática de bacias hidrográficas. *Revista Brasileira de Cartografia.*, 61(2), 2011.

MELLO, C. D., LIMA, J. M., SILVA, A. M., MELLO, J. M., & OLIVEIRA, M. S. Krigagem e inverso do quadrado da distância para interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo.*, 27(5):925-933, 2003.

MERCHANT, D.C., Spatial accuracy standards for large scale maps. In: *ACSM 42ND ANNUAL MEETING. Proceedings.* p.222-231, 1982.

MICELI, B. S., DIAS, F. D. M., SEABRA, F. M., DOS SANTOS, P. R. A., & FERNANDES, M. D. C. Avaliação vertical de modelos digitais de elevação (MDEs) em diferentes configurações topográficas para médias e pequenas escalas. *Revista Brasileira de Cartografia.*, 63(1), 2011.

MOTOMIYA, A. V. A.; CORA, J. E. & PEREIRA, G. T. Uso da krigagem indicatriz na avaliação de indicadores de fertilidade do solo. *Revista Brasileira de Ciência Solo.*, 0(3): 485-496, 2006.

MUKHERJEE, S., JOSHI, P. K., MUKHERJEE, S., GHOSH, A., GARG, R. D., & MUKHOPADHYAY, A. Evaluation of vertical accuracy of open source Digital Elevation Model (DEM). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation.*, 21:205-217, 2013.

NOBRE, A. D., CUARTAS, L. A., HODNETT, M., RENNÓ, C. D., RODRIGUES, G., SILVEIRA, A. & SALESKA, S. Height above the nearest drainage – a hydrologically relevant new terrain model. *Journal of Hydrology.*, 404(1):13-29, 2011.

ODEH, I. O. A.; CHITTLEBOROUGH, D. J. & MCBRATNEY, A. B. Elucidation of soil-landform interrelationships by canonical ordination analysis. *Geoderma.*, 49:1-32, 1991.

OIMOEN, M. J. An effective filter for removal of production artifacts in US Geological Survey 7.5-minute digital elevation models. In: *FOURTEENTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED GEOLOGIC REMOTE SENSING. Proceedings.* p.06-08, 2000.

- OKSANEN, J., & SARJAKOSKI, T. Error propagation of DEM-based surface derivatives. *Computers & Geosciences.*, 31(8):1015-1027, 2005.
- OLIVER, M. A. & WEBSTER, R. Kriging: a method of interpolation for geographical information systems. *International Journal of Geographical Information System.*, 4(3):313-332, 1990.
- OLIVEIRA, M. J. Proposta metodológica para delimitação automática de áreas de preservação permanente em topos de morro e em linhas de cumeada. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 2002. (Tese de Doutorado)
- OLIVEIRA, C. G. D., & PARADELLA, W. R. Evaluating the quality of the Digital Elevation Models produced from ASTER stereoscopy for topographic mapping in the Brazilian Amazon Region. *Anais da Academia Brasileira de Ciências.*, 81(2):217-225, 2009.
- OLIVEIRA, G. C. & FERNANDES FILHO, E. I. Metodologia para delimitação de APPs em topos de morros segundo o novo Código Florestal brasileiro utilizando sistemas de informação geográfica. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16, 2013. Foz do Iguaçu. Anais. São José dos Campos: INPE, 2013.
- PAGE, S. E. et al. The amount of carbon released from peat and forest fires in Indonesia during 1997. *Nature.*, 420(6911):61-65, 2002.
- PANIAGO, M. C. T. Evolução histórica e tendências de mudanças socioculturais na comunidade de Viçosa, MG. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 1983. 78 p. (Dissertação de Mestrado)
- PELUZIO, T. M. O.; SANTOS, A. R. & FIEDLER, N. C. Mapeamento de áreas de preservação permanente no ARCGIS 9.3. Alegre: Caufes, 2010.
- PIKE, R. J. Geomorphometry diversity in quantitative surface analysis. *Progress in Physical Geography.*, 24:1–20, 2000.
- PIRES, J. M., NASCIMENTO, M. D., SANTANA, R. M., & RIBEIRO, C. A. A. S. Análise da exatidão de diferentes métodos de interpolação para geração de modelos digitais de elevação e obtenção de características morfométricas em bacias hidrográficas. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos.*, 10(2):39-47, 2005.
- REES, W.G. The accuracy of digital elevation models interpolated to higher resolutions. *International Journal of Remote Sensing.*, 21:7–20, 2000.
- REIS, A. A. D., TEIXEIRA, M. D., ACERBI JÚNIOR, F. W., MELLO, J. M. D., LEITE, L. R., & SILVA, S. T. D. Land use and occupation analysis of Permanent Preservation Areas in Lavras County, MG. *Ciência e Agrotecnologia.*, 36(3):300-308, 2012.

- RIBEIRO, K. T., & FREITAS, L. Impactos potenciais das alterações no Código Florestal sobre a vegetação de campos rupestres e campos de altitude. *Biota Neotropica.*, 10(4):239-246, 2010.
- RIBEIRO, C. A. A. S.; OLIVEIRA, M. J.; SOARES, V. P. & PINTO, F. A. C. Delimitação automática de áreas de preservação permanente em topos de morro e em linhas de cumeada: metodologia e estudo de caso. In: SEMINÁRIO DE ATUALIZAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO E SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS APLICADOS À ENGENHARIA FLORESTAL, 5., 2002, Curitiba. Anais. Curitiba: FUPEF, 2002.
- RODRIGUES, T. L., DEBIASI, P., & DE SOUZA, R. F. Avaliação da Adequação dos Produtos ASTER GDEM no Auxílio ao Mapeamento Sistemático Brasileiro. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 3, Recife-PE. Anais. 2010, p. 27-30.
- SOUZA, J. M. D. Análise da qualidade cartográfica dos dados da Shuttle Radar Topography Mission-SRTM. Florianópolis, SC, Universidade Federal de Santa Catarina, 2006. (Dissertação de Mestrado).
- SOUZA, J. M. D., & LOCH, R. E. N. Como melhorar a qualidade geométrica do modelo digital de elevação da Shuttle Radar Topography Mission, SRTM-3. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13, 2007. Anais. 2007, p. 1369-1376.
- ARENAS-RÍOS, M. Estudo Cartografia geotécnica e visões fractais da geometria do relevo. Brasília, DF, Universidade de Brasília, 2012. 123 p. (Dissertação de Mestrado).
- RUEDA, A., NOGUERA, J. M., & MARTÍNEZ, C. A flooding algorithm for extracting drainage networks, from unprocessed digital elevation models. *Computers & Geosciences.*, 59:116 – 123, 2013.
- SAMUEL-ROSA, A., ANJOS, L., VASQUES, G., & HEUVELINK, G. Evaluation of freely available ancillary data used for detailed soil mapping in Brazil. In: EGU GENERAL ASSEMBLY CONFERENCE ABSTRACTS, 16:769, 2014.
- SANTOS, A. de P. Avaliação da acurácia posicional em dados espaciais com o uso de estatística espacial. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 2010. (Dissertação de Mestrado)
- SILVA, N. R. S., MARTINS, S. V., MEIRA NETO, J. A. A., & SOUZA, A. L. D. Composição florística e estrutura de uma floresta estacional semidecidual montana em Viçosa, MG. *Revista Árvore.*, 28(3):397-405, 2004.
- SILVA, A. S. Mineração e áreas de preservação permanentes (APPs) em Santo Antônio De Pádua-RJ. *Sociedade & Natureza.*, 23(2):173-185, 2011.

- SILVA, J. A. A. D., NOBRE, A. D., MANZATTO, C. V., JOLY, C. A., RODRIGUES, R. R., SKORUPA, L. A. & RECH FILHO, E. L. O Código Florestal e a Ciência: contribuições para o diálogo, 2011.
- SIRTOLI, A. E.; SILVEIRA, C. T.; MONTOVANI, L. E.; SIRTOLI, A. R. A. & OKAFIORI, C. Atributos do relevo derivados de modelo digital de elevação e suas relações com solos. *Scientia agraria.*, 9(3):317-329, 2008.
- SOARES, V. P., MOREIRA, A. D. A., RIBEIRO, C. A. A. S., GLERIANI, J. M., & JUNIOR, J. G. Mapeamento de áreas de preservação permanentes e identificação dos conflitos legais de uso da terra na bacia hidrográfica do ribeirão São Bartolomeu–MG. *Revista Árvore.*, 35(3):555-563, 2011.
- TACHIKAWA, T., HATO, M., KAKU, M., & IWASAKI, A.. Characteristics of ASTER GDEM version 2. In: GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS), 2011, IEEE. Proceedings. 2011. p. 3657-3660.
- TESKE, R., GIASSON, E., & BAGATINI, T. Comparação do uso de modelos digitais de elevação em mapeamento digital de solos em Dois Irmãos, RS, Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo.*, 38(5):1367-1376, 2014.
- VALERIANO, M. M. & ROSSETTI, D. F. Topodata: Brazilian full coverage refinement of SRTM data. *Applied Geography.*, 32(2):300-309, 2012.
- VARJABEDIAN, R. & MECCHI, A. As APPS de topo de morro e a lei 12.651/12. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 14, Rio de Janeiro, 2013. Anais. Rio de Janeiro, 2013.
- VASCONCELOS, M. F. Mountaintop endemism in eastern Brazil: why some bird species from campos rupestres of the Espinhaço Range are not endemic to the Cerrado region?. *Revista Brasileira de Ornitologia.*, 16(35):15, 2013.
- VICTORIA, D. de C.; HOTT, M. C. & MIRANDA, E. E. Delimitação de áreas de preservação permanente em topos de morros para o território brasileiro. Embrapa Monitoramento por Satélite. Artigo em periódico indexado (ALICE), 2008.
- VICTORIA, D. C. Influência da escala em uma metodologia de delimitação automática de áreas de preservação permanente em topo de morro e montanha e adaptação do método para escalas detalhadas. *Revista Brasileira de Cartografia.*, 62(03):479 – 488, 2010.
- VIEIRA, M. M., PELUZIO, T. M. D. O., SAITO, N. S., SOUZA, S. M. D., OLIVEIRA, F. L. R. D., & SANTOS, A. R. D. Delimitação das áreas de preservação permanente do terço superior de topo de morro, para as microrregiões sudoeste serrana, litoral norte e extremo norte do estado do Espírito Santo. *Revista Brasileira de Agroecologia.*, 6(2):142-151, 2011.

- VOSSSELMAN, G., & MAAS, H. G. Adjustment and filtering of raw laser altimetry data. In: OEEPE WORKSHOP ON AIRBORNE LASERSCANNING AND INTERFEROMETRIC SAR FOR DETAILED DIGITAL TERRAIN MODELS, Estocolmo, Suécia, 2001. Proceedings. Estocolmo, 2001.
- WALKER, J. P. & WILLGOOSE, G. R. On the effect of digital elevation model accuracy on hydrology and geomorphology. *Water Resources Research.*, 35(7):2259-2268, 1999.
- WATSON, D. F. & PHILIP, G. M. A refinement of inverse distance weighted interpolation. *Geo-processing.*, 2(4):315-327, 1985.
- WECHSLER, S. P. Perceptions of digital elevation model uncertainty by DEM users. *URISA.*, 15(2):57-64, 2003.
- WECHSLER, S. P. Uncertainties associated with digital elevation models for hydrologic applications: a review. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions.*, 11(4):1481-1500, 2007.
- WONG, D. W. & LEE, J. Statistical analysis of geographic information with ArcView GIS and ArcGIS. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2005.
- WOOD, J.D. & FISHER, P.F. Assessing interpolation accuracy in elevation models. *Computer Graphics and Applications.*, 13(2):48-56, 1993.
- ZANDBERGEN, P. A. Positional Accuracy of Spatial Data: Non-Normal Distributions and a Critique of the National Standard for Spatial Data Accuracy. *Transactions in GIS.*, 12(1): 103-130, 2008.
- ZHANG, W. & MONTGOMERY, D. R. Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrologic simulations. *Water resources research.*, 30(4):1019-1028, 1994.