

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO COM DISTINTAS CARACTERÍSTICAS DE PROCESSAMENTO E AQUISIÇÃO

Comparative analysis between Digital Elevation Models with distinctive features of processing and acquisition

Ricardo Michael Pinheiro Silveira*
Claudinei Taborda da Silveira*

***Universidade Federal do Paraná - UFPR**

Programa de Pós-Graduação em Geografia (PPGGEO) / Laboratório de Pesquisas Aplicadas em Geomorfologia e Geotecnologias (LAGEO)

Rua Cel. Francisco H. dos Santos, S/N – Centro Politécnico – Edifício João José Bigarella, Sala 203 – Campus Curitiba, Paraná, Brasil – CEP: 81531-980

ricardomichael@ufpr.br

claudineits@ufpr.br

RESUMO

A utilização cada vez mais abrangente de Modelos Digitais de Elevação (MDEs) denota a necessidade do reconhecimento das limitações e potencialidades da modelagem e seus efeitos nos produtos derivados. Nessa perspectiva, o presente trabalho tem como objetivo analisar, por cálculos estatísticos comparativos, matriz de confusão e técnicas de geoprocessamento, as diferenças inerentes entre MDEs com distintas características de aquisição na área de estudo que compreende a porção central da Serra do Mar no estado do Paraná, Brasil. Primeiramente foram avaliados os efeitos da variação do tamanho de célula (5, 10, 15 e 20 metros) de um Modelo Digital do Terreno (MDT) interpolado pelo método Topogrid a partir de base vetorial planialtimétrica na escala 1:25.000, tanto para os valores de altimetria quanto para os atributos topográficos declividade, plano de curvatura e índice topográfico de umidade. Posteriormente foram realizados testes entre o MDT Topogrid e outros MDEs amplamente utilizados e de resolução mais grosseira: MDEs SRTM (90m v1, 90m v4, 30m v1, banda-C versão 4 e banda X), Aster GDEM e MDEs do acervo Topodata. Os resultados evidenciaram as discrepâncias entre os MDEs, destacando que o emprego dos modelos para fins específicos deve se pautar em rigorosos critérios metodológicos. Conclui-se que a aplicação dos MDEs deve ser condizente à escala dos dados, aos métodos de processamento dos modelos, à escolha da resolução horizontal e aos algoritmos empregados no cálculo de atributos topográficos.

Palavras-chave: Geomorfometria. Modelagem geomorfológica. Análise Digital do Terreno. MDE.

ABSTRACT

The use increasingly embracing of Digital Elevation Models (DEMs) denotes the need to recognize the limitations and potential of modeling and its effects on derivatives. In this perspective, this study aims to analyze, by comparative statistical calculations, confusion matrix and geoprocessing techniques, the inherent differences between DEMs with different acquisition characteristics in the study area comprising the central portion of the Serra do Mar, state of Paraná, Brazil. First was evaluated the effects of variation in cell size (5, 10, 15 and 20 meters) of a Digital Terrain Model (DTM) interpolated by Topogrid method from planialtimetric vector based on the scale 1: 25,000, both altimetry values and topographic attributes slope, plan of curvature and topographic wetness index. Later tests were performed between MDT Topogrid and other widely used coarser resolution DEMs: SRTM DEMs (90m v1, v4 90m, 30m v1, C-band version 4 and X band), Aster GDEM and DEMs of Topodata collection. The results show the discrepancies between the DEMs, noting that the use of models for specific purposes should be based on rigorous methodological criteria. It follows that the application of modes must be matched to the scale of the data processing methods of the models, the choice of horizontal resolution, and the algorithms used in the calculation of topographic attributes. It was concluded that the application of DEMs must be matched to the scale of the data, the processing methods of the models, the choice of horizontal resolution and the algorithms used in the calculation of topographic attributes.

Keywords: Geomorphometry. Geomorphological modeling. Digital Terrain Analysis. DEM.

1 INTRODUÇÃO

Recentemente, a integração dos Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) com ferramentas de análise estatística em Modelos Digitais de Elevação (MDEs) tem aumentado o poder analítico da geomorfologia moderna (EVANS *et al.*, 2009). A geomorfometria, definida como a ciência da análise quantitativa da superfície terrestre (PIKE, 2000), tem como enfoque a extração de medidas descritivas (parâmetros) e feições da superfície terrestre (objetos) (MARK e SMITH, 2004; WILSON, 2012), cujas aplicações são amparadas pela análise digital do relevo.

Os MDEs são muito utilizados por prover coberturas contínuas para áreas extensas e com relativo baixo custo, sendo que a computação digital automatizada fornece as medidas de formas da superfície, de contexto, de padrões e de textura que podem ser utilizados como substitutos para os critérios considerados na interpretação visual de imagens ou fotografias aéreas (HENGL e MACMILLAN, 2009).

Conforme Nelson *et al.* (2009), há três fontes de dados para a construção de MDEs: a) Técnicas de levantamento de campo, com a aquisição de pontos precisos de latitude, longitude e elevação (x, y, z); b) Mapas topográficos existentes, com a derivação de curvas de nível, drenagens, lagos e pontos de elevação; c) Sensoriamento remoto, com a interpretação de fotografias aéreas ou de imagens adquiridas de satélites, com destaque para a fotogrametria (métodos estereocópicos), radares e, mais recentemente, levantamentos *Laser*.

Conceitualmente, conforme apontam Pike *et al.* (2009) e Li *et al.* (2005), há muitas divergências conceituais entre os termos empregados, sobretudo entre “Modelo Digital de Elevação” e “Modelo Digital do Terreno”, sendo que muitas vezes ambos são empregados como sinônimos. Para outros, como Zhou *et al.* (2008), o MDE se refere à representação da elevação unicamente, enquanto o MDT é uma derivação que contém a representação de atributos ou objetos.

Entretanto, no presente trabalho adotou-se a interpretação de El-Sheimy *et al.* (2005).

Segundo os autores, os Modelos Digitais do Terreno (MDTs) se referem aos valores altimétricos do terreno desconsiderando quaisquer objetos na superfície (como árvores ou construções). Já os Modelos Digitais de Elevação (MDEs) se referem aos valores altimétricos contemplando os objetos existentes na superfície. De modo geral, para se referir a um conjunto de modelos digitais, sejam do terreno ou de elevação, adotou-se a designação MDE.

Quanto às aplicações, Hengl e MacMillan (2009) citam que o principal argumento utilização de MDEs para o mapeamento e modelagem de paisagens naturais é a variedade de medidas, mensurações e objetos que podem ser derivados pela análise automatizada dos dados de elevação. Essa análise pode extrair, de modo rápido e consistente, muitos parâmetros ou objetos que podem ser considerados como análogos diretos dos critérios utilizados pelo intérprete manual para identificar e delinear objetos aplicados à pedologia, ecologia, geomorfologia e geologia.

Entretanto, destaca-se que os MDEs e subprodutos derivados, com utilização crescente, sobretudo na última década, devido à disponibilidade cada vez maior de bases de dados em formato digital e também de *softwares* que contemplam ferramentas de análise digital do relevo, comumente vêm sendo empregados de modo arbitrário e sem critérios metodológicos.

Informações fundamentais relacionadas à escala dos dados, métodos de processamento dos modelos, escolha da resolução horizontal, variáveis direcionais empregadas no cálculo de atributos topográficos, adoção do tamanho da janela móvel para cálculos de vizinhança, entre outras, frequentemente são omitidas nas discussões metodológicas. Alguns trabalhos recentes, como publicado por Chagas *et al.* (2010) e Miceli *et al.* (2011), têm a preocupação com essas questões antecedentes à aplicação dos MDEs.

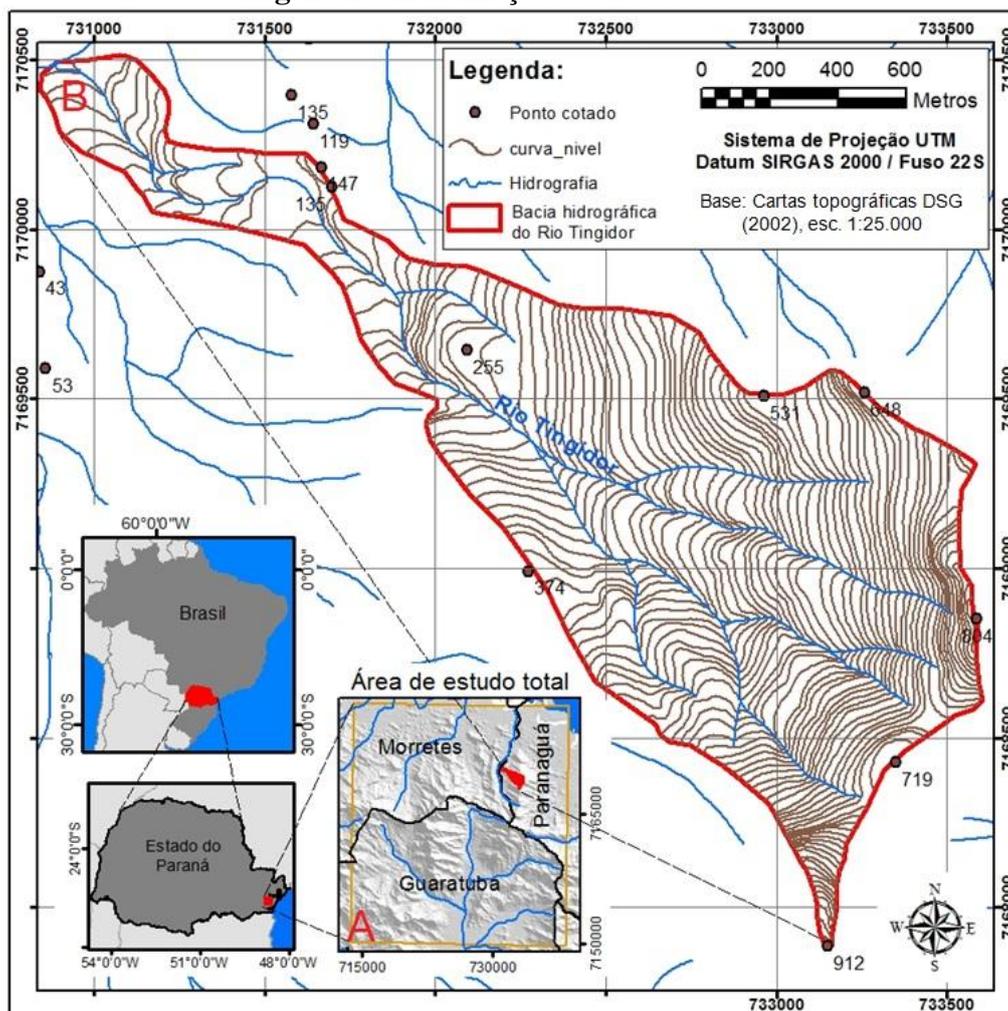
Nessa perspectiva, o presente trabalho tem como objetivo analisar, por cálculos estatísticos comparativos, matriz de confusão e técnicas de geoprocessamento, as diferenças inerentes entre sete MDEs com distintas características de aquisição (*Topogrid*, SRTM90v2, SRTM90v4, SRTM30v1,

SRTM-X, Topodata e ASTER GDEM) na área de estudo que compreende a porção central da Serra do Mar no estado do Paraná, Brasil.

1.1 Localização e caracterização da área de estudo

O recorte definido como área de estudo (figura 1A), localizado na porção leste do estado do Paraná, compreende quatro cartas topográficas na escala 1:25.000 (2858-1 NE, 2858-1 SE, 2858-2 NO e 2858-2 SO), derivadas do Programa Proteção da Floresta Atlântica - Paraná (PRÓ-ATLÂNTICA), elaborado pela Diretoria de Serviço Geográfico (DSG), no ano de 2002. Abrange parcialmente quatro municípios paranaenses: Morretes, Guaratuba, Paranaguá e, numa pequena porção a sudeste, Matinhos. Totaliza área de 686,2 km².

Figura 1 – Localização da área de estudo



Em termos geomorfológicos a área de estudo se situa na porção central da Serra do Mar paranaense, margeada a norte e a sul pela Planície Litorânea. São duas importantes unidades de paisagem que conferem ao recorte uma gama variada de feições e processos geomorfológicos atuantes.

Conforme o mapeamento geomorfológico do estado do Paraná (SANTOS *et al.*, 2006; OKA-FIORI *et al.*, 2006), a Serra do Mar configura-se como uma cadeia de montanhas marginal do Primeiro Planalto Paranaense, separando-o da Planície Litorânea, com cimos elevados de até 1.800 metros de altitude, sustentada por litologias diversas, quase sempre metamórficas de alto grau como

migmatitos, gnaisses e xistos e mais raramente quartzitos, frequentemente associados com rochas intrusivas relacionadas a ciclos metamórficos mais jovens.

Auxiliariamente, a sub-bacia hidrográfica do rio Tingidor (figura 1B), afluente do rio Jacareí, localizado na Serra da Prata, município de Paranaguá/PR, foi adotada como recorte individualizado em função da limitação de processamento para determinadas comparações realizadas entre os modelos.

Além disso, a adoção deste recorte realçado ante a área de estudo em sua totalidade está associada à sua configuração geomorfológica recente e à relevância da compreensão de processos geomórficos atuantes na bacia. A região da Serra da Prata foi uma das mais atingidas pelos movimentos de massa ocorridos em março de 2011, caracterizando-se como um evento de grandes proporções que acarretou severas modificações na paisagem e muitos danos para a população local.

Conforme Silveira *et al.* (2013) o volume de material desprendido dos escorregamentos consistiu em blocos de rocha, solo e troncos de árvores, arrancados e transportados seguindo caminho de fluxo nos segmentos convergentes das vertentes. Nesse processo de transporte, foram remobilizados depósitos pretéritos, na forma de solos e blocos de rocha. Todo o volume de material fluiu em direção às planícies, com o material mais grosseiro tendendo a se depositar na saída dos canais, formando cones de detritos, enquanto lama atingiu grandes extensões do vale, levando a inundação e formação de depósitos de sedimentos finos em expressiva área da planície aluvial.

Dessa forma, as primeiras análises foram realizados apenas para a sub-bacia hidrográfica do rio Tingidor (figura 1B) e as demais para todo o recorte da área de estudo (figura 1A).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Com o intuito quantificar as diferenças entre distintos Modelos Digitais de Elevação, tanto para os valores de altimetria quanto para atributos topográficos derivados, foram realizados testes estatísticos comparativos primeiramente entre quatro MDTs Topogrid, variando apenas o tamanho da célula (5, 10, 15 e 20 metros), e, num segundo momento, testes entre o MDT Topogrid e MDEs globais amplamente utilizados (SRTM, em suas diversas versões, e Aster GDEM) que apresentam resoluções espaciais mais grosseiras. No primeiro caso, os testes foram feitos apenas para a sub-bacia hidrográfica do rio Tingidor, e no segundo, para toda a área de estudo.

2.1 Aquisição dos Modelos Digitais de Elevação

2.1.1 MDT Topogrid

O Modelo Digital do Terreno foi gerado a partir de dados planialtimétricos vetoriais (curvas de nível, pontos cotados e hidrografia) extraídos das cartas topográficas 2858-1 NE, 2858-1 SE, 2858-2 NO e 2858-2 SO, na escala 1:25.000 (DSG, 2002), com base no método de interpolação denominado *Topogrid*, baseada na proposta de Hutchinson (1988).

A etapa de definição do tamanho da célula (*pixel*) do MDT foi pautada em contribuições de Hengl (2006), sob duas perspectivas: cartográfica, considerando a escala original da base de dados, e topográfica, considerando as características morfométricas locais e complexidade do terreno.

A abordagem cartográfica é amparada pela proposta de delimitação mínima legível (DML) e de acurácia máxima local (AML), de Vink (1975). Ambas são definidas em função da menor área a ser mapeada. A DML, que indica os valores máximos, é referenciada como 2,5mm no mapa, resultando em resoluções grosseiras. Já a AML, que indica os valores mínimos, varia de 0,25mm a 0,1mm, resulta em resoluções mais finas referentes à menor área discernível num mapa. Como valor intermediário, Hengl (2006) recomenda a utilização de 0,5mm como referência para

determinação do tamanho da *célula*. A equação 1 indica essa proposta cartográfica de definição do tamanho da célula:

$$p = FE \cdot 0,0005 \quad (\text{equação 1})$$

onde p é a resolução do *célula*, em metros, FE é o fator de escala e o valor numérico (já convertido em metros) se refere ao valor pretendido para a DML ou AML.

Assim, considerando a escala 1:25.000 das cartas topográficas utilizadas para a criação do MDT, o tamanho recomendado para o *célula* varia entre 62,5m (DML), 6,25m - 2,5m (AML) e 12,5m (valor intermediário recomendado).

Complementarmente também foi aplicada a abordagem que contempla as características topográficas locais. Nessa proposta, a resolução horizontal do MDT pode ser estimada numa relação entre as curvas de nível e área, sendo:

$$p = \frac{A}{2 \cdot \sum l} \quad (\text{equação 2})$$

onde p é o tamanho da célula, A é a área total e $\sum l$ é o somatório do comprimento de todas as curvas de nível do recorte avaliado.

Com a finalidade de precisar a adoção do tamanho da célula em função das porções do terreno que apresentam maior rugosidade, Hengl (2006) propõe que este mesmo cálculo seja efetuado em um recorte com 5% da área total no local onde há maior concentração de curvas de nível.

A aplicação da fórmula para todo o recorte definido como área de estudo apontou que a célula deve ter 16,3m. Quando aplicada na porção de 5% da área total com maior concentração de curvas de nível (topos da Serra da Prata), o valor obtido foi de 10,4m.

Com base nos resultados obtidos por estas distintas proposições, o tamanho de célula adotado para o MDT de referência (conforme as recomendações metodológicas) foi definido em 15x15 metros, totalizando uma grade de 1671x1875 células para toda a área de estudo.

2.1.2 MDEs de diversas fontes de aquisição e processamento

Os outros seis MDEs empregados na análise comparativa foram:

- MDE SRTM90, banda C, versão 2, com resolução de 3 arcos de segundo (aproximadamente 90 metros, na área de estudo), obtidos pelo programa *Spaceborne Imaging Radar* a bordo do ônibus espacial *Endeavour* e disponibilizados pela *National Geospatial-Intelligence Agency* (NGA), dos Estados Unidos da América.

- MDE SRTM90, banda C, versão 4, criado por diversos pós-processamentos (como MDEs auxiliares e técnicas de interpolação) tendo como referência as versões prévias dos dados SRTM e disponibilizado pelo *Consortium for Spatial Information* (CGIAR-CSI), dos Estados Unidos da América.

- MDE SRTM30, banda C, versão 1, que contempla as mesmas características de aquisição do SRTM90-v2, mas possui resolução de 1 arco de segundo (aproximadamente 30 metros, na área de estudo). Até o final de 2014 essa versão era disponibilizada publicamente apenas para o território estadunidense, sendo vendida comercialmente para as demais regiões do planeta. Desde então esses dados foram liberados gratuitamente e disponibilizados pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos da América (USGS).

- MDE SRTM, banda X, obtido pelo programa *Synthetic Aperture Radar* (radar de abertura sintética) a bordo do ônibus espacial *Endeavour*, com resolução espacial de 30 metros e disponibilizado pela *Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt* (DLR), a Agência Aeroespacial Alemã.

- MDE do acervo Topodata, que consiste no pós-processamento dos dados SRTM90 por *krigagem* e com resolução reamostrada para 30 metros, com resultados publicados por Valeriano (2004) e Valeriano e Rossetti (2011) e disponibilizados pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), do Brasil.

- Aster GDEM, versão 2, com resolução de 30 metros, cujos valores de elevação foram obtidos a partir do par estereoscópico de imagens do infravermelho próximo geradas no subsistema VNIR por meio de dois sensores a bordo do satélite *Terra*. Os dados são disponibilizados pela *Japan Space Systems*.

2.2 Comparação entre MDTs Topogrid

Inicialmente, conforme citado, as primeiras comparações foram feitas apenas entre MDTs *Topogrid*, pois mesmo com a adoção de critérios metodológicos para a definição da célula do MDT interpolado a partir de base planialtimétrica, há divergência entre os valores indicados. Os testes apontaram que a resolução apropriada para a área de estudo varia, predominantemente, de 6 a 16 metros. Dessa forma, para fins comparativos, foram gerados quatro MDTs com células de 5, 10, 15 e 20 metros, considerado um intervalo confiável em que todas as resoluções são amparadas pelos critérios metodológicos aplicados.

Os quatro MDTs foram gerados pelo mesmo processo de interpolação (*Topogrid*) e a partir da mesma base cartográfica digitalizada (dados vetoriais das cartas topográficas 1:25.000). Em seguida, foram calculados os atributos topográficos: declividade (conforme algoritmo de Horn (1981)), plano de curvatura (conforme algoritmo de Zevenbergen e Thorne (1987)) e índice topográfico de umidade (calculado pelo método D-infinito (Tarboton (1997)), para cada um dos quatro MDTs.

Os produtos obtidos foram comparados entre si (valores contínuos) por uma correlação linear, objetivando estabelecer estimativas estatísticas para a compreensão da sensibilidade dos atributos topográficos em relação à mudança de resolução espacial.

Por fim, para avaliar os efeitos da variação do tamanho da célula em atributos topográficos discretizados, unicamente para a declividade foi aplicada uma matriz de confusão (SILVEIRA, 2010; SILVEIRA *et al.*, 2012), também denominada matriz de erros. As seis classes de declividade, em porcentagem, seguem a proposta da EMBRAPA (2006): 0 a 3%; 3 a 8%; 8 a 20%; 20 a 45%; 45 a 75%; > 75%. Se nos testes da correlação linear o objetivo é avaliar a interferência do tamanho da célula do MDT em valores contínuos, a matriz de confusão tem como foco os valores discretos.

A matriz de confusão permite o cálculo do percentual de concordância entre as classes de declividade mapeadas pelo valor da exatidão global, conforme equação 3:

$$EG = \frac{nc}{nt} \quad (\text{equação 3})$$

onde *nc* corresponde ao número de células coincidentes classificadas e *nt* ao número de células total da matriz.

2.3 Comparação estatística entre Modelos Digitais de Elevação

Além da comparação de MDTs gerados a partir da mesma base e com o mesmo método de processamento, também foram realizados testes entre o MDT *Topogrid* 15x15m (empregado como referência) em relação a outros MDEs obtidos por distintos métodos de extração de altimetria: MDE SRTM90 v2, MDE SRTM90 v4, MDE SRTM30 v1, MDE SRTM-X, MDE do acervo Topodata e Aster GDEM v2.

Os MDEs foram comparados estatisticamente entre si, contemplando a altimetria e declividade, com o cálculo do erro máximo (subtração de dois MDEs), erro médio e desvio padrão.

Seguidamente, utilizaram-se os pontos cotados da base cartográfica alocados no recorte da área de estudo como pontos de controle (adequados à escala 1:25.000) para calcular o erro médio quadrático (equação 4) dos MDEs:

$$EMQ = \sqrt{\frac{\sum(z_i - z_t)^2}{n}} \quad (\text{equação 4})$$

onde z_i é o valor altimétrico da célula, z_t é o valor do ponto de controle e n é o número total de pontos do controle.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das análises comparativas são apresentados em duas etapas: primeiramente os resultados dos testes realizados na sub-bacia hidrográfica do rio Tingidor com os MDTs Topogrid (célula de 5, 10, 15 e 20 metros) e, num segundo momento, os resultados dos testes entre o MDT Topogrid 15m e os demais MDEs empregados.

3.1 Comparação entre MDTs *Topogrid* na sub-bacia hidrográfica do rio Tingidor

Os quatro MDTs gerados para a sub-bacia hidrográfica do rio Tingidor, seguido do cálculo da declividade, plano de curvatura e ITU para cada um deles (figura 2), demonstraram que apesar do processamento ser realizado a partir de uma única base cartográfica, pelo mesmo método de interpolação e com os valores recomendados de célula amparados pela literatura, todos num intervalo confiável, ainda sim a variação resultante é muito significativa.

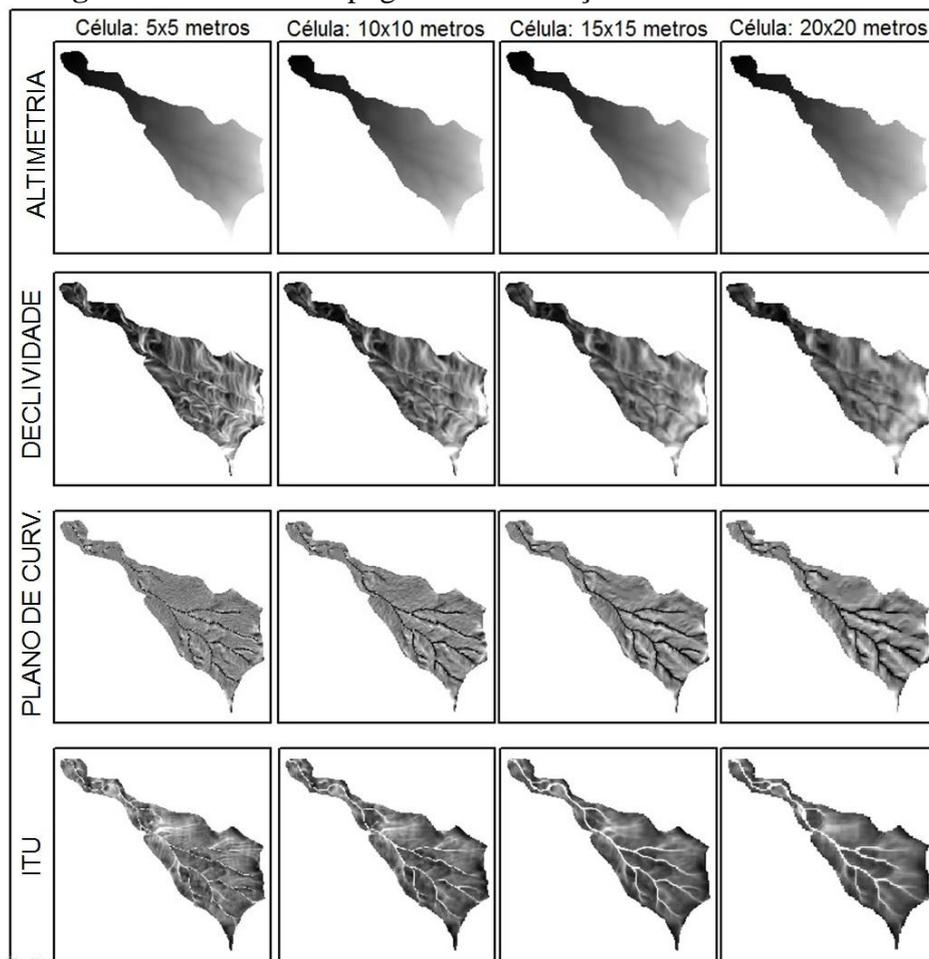
Visualmente se nota que o efeito de generalização/detalhamento da resolução horizontal é evidenciado, sobretudo nos atributos topográficos, sendo mais difícil de perceber as diferenças dessa variação nos valores altimétricos.

A comparação estatística realizada pela correlação linear (tabela 1) reforça as considerações ilustradas pela visualização espacializada. Dentre as seis comparações feitas entre os MDTs e seus atributos derivados, todas entre si, em todos os casos a altimetria apresentou correlação linear de 0,999, sendo um valor muito alto e próximo da correlação máxima.

Entretanto, esse é um resultado que, se apresentado isoladamente, omite as discrepâncias que as diferenças nos valores de elevação causam nos atributos derivados. Se, num primeiro momento, a variação da resolução horizontal do MDT parece não interferir significativamente nos dados morfométricos, os valores de correlação dos atributos mostram o contrário.

Para a declividade, os valores da correlação linear apresentaram diferenças mais evidentes em relação à altimetria, chegando ao valor mínimo de 0,74 na comparação entre os MDTs de resoluções mais discrepantes (5 e 20 metros). A melhor correlação foi de 0,92 para os MDTs de menor resolução (5 e 10 metros), destacando que mesmo para essa primeira derivada do MDT há muitas mudanças nos produtos gerados.

As principais diferenças foram denotadas pelo plano de curvatura, cuja maior correlação foi de apenas 0,45 entre a comparação da resolução de 15 e 20 metros. O menor valor obtido, de 0,2 entre o MDT de 5 e 20 metros, evidencia que este atributo topográfico é muito sensível à variação do tamanho da célula e apresenta pouca representatividade de um modelo para outro. Somado a estes resultados, ao se considerar outros algoritmos para o cálculo dos atributos topográficos, outros tamanhos da janela de vizinhança (5x5, 7x7, 9x9, por exemplo) e outros MDEs obtidos por distintos métodos de extração da altimetria, os valores de correlação seriam ainda mais discrepantes.

Figura 2 – Atributos topográficos e variação do tamanho da célula**Tabela 1** – Correlação linear entre atributos topográficos

Correlação linear entre MDTs	ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS			
	Altimetria	Declividade	Plano de curvatura	Índice Topográfico de Umidade
5m x 10m	0.999	0.923	0.312	0.468
5m x 15m	0.999	0.835	0.271	0.335
5m x 20m	0.999	0.741	0.208	0.241
10m x 15m	0.999	0.911	0.37	0.524
10m x 20m	0.999	0.839	0.285	0.373
15m x 20m	0.999	0.918	0.457	0.555

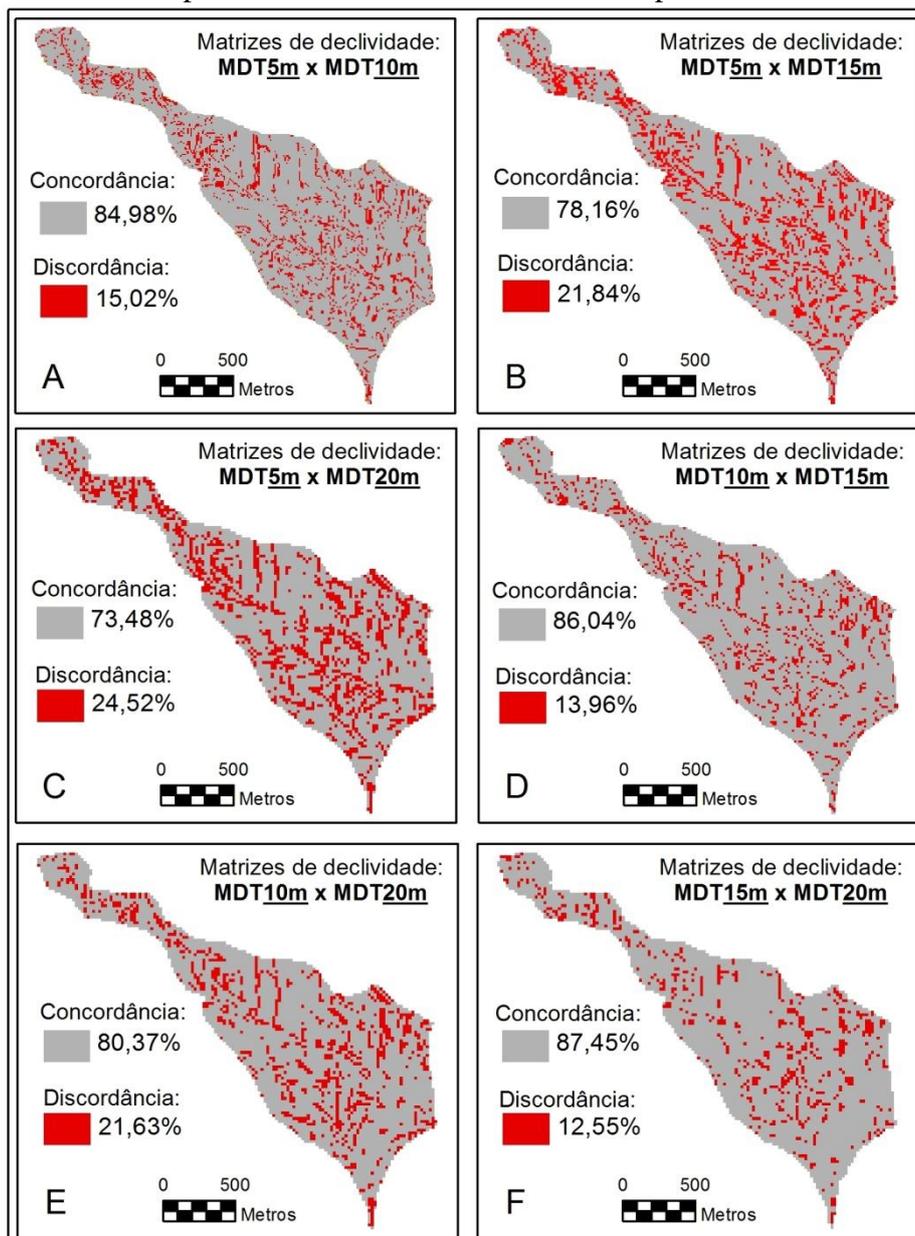
Para o índice topográfico de umidade, único atributo topográfico secundário testado, a correlação variou de 0,24 (MDT 5m x MDT 20m) a 0,55 (MDT 15m x MDT 20m), tendo resultados sensivelmente melhores que o plano de curvatura. Entretanto, as diferenças se mostraram igualmente significativas.

Cabe destacar que o ITU mantém seu padrão espacial quando discretizado, ou seja, os divisores de água e os canais de drenagem, por exemplo, em todos os MDTs testados aparecem bem representados. Já os segmentos convergentes/divergentes, obtidos pela discretização do plano de curvatura, são classificados de modo muito distinto entre os quatro MDTs. Isso se deve ao fato de que o ITU considera a somatória do fluxo acumulado (de todo o recorte) no seu cálculo, enquanto o plano de curvatura é definido pela análise local da vizinhança mais próxima (apenas 8 células de entorno), sem fazer relação com o restante da área de estudo.

Todos os resultados obtidos pela correlação linear se deram a partir da comparação em valores contínuos, célula a célula. Com a finalidade de analisar os efeitos da variação da resolução do MDT em atributos discretizados, tomando a declividade segmentada por seis classes como exemplo, a matriz de confusão permitiu quantificar o índice de exatidão global entre as classes mapeadas e os erros de um modelo para outro.

Os resultados obtidos são representados pela figura 3, com todas as comparações compiladas, em síntese, para cada uma das comparações feitas (5-10m, 5-15m, 5-20m, 10-15m, 10-20m e 15-20m, respectivamente) e com os valores concordantes e discordantes espacializados na sub-bacia hidrográfica do rio Tingidor.

Figura 3 – Resultados espacializados da matriz de confusão aplicada às classes de declividade



A exatidão global média entre as seis comparações foi de 81,7%, sendo que o menor valor foi de 73,4% (5-20m, figura 3C) e o maior foi de 87,4% (15-20m, figura 1F). O erro médio de 18,3% indica que as classificações não podem ser adotadas de modo determinístico, dada a divergência apresentada. Em termos espaciais, a cada 10.000m² as áreas discordantes podem variar

de 170m² a 670m². Significa dizer que a cada 100 pontos de controle de campo dos mapas de declividade, de 14 a 27 pontos estariam representados por classes diferentes. Para tornar a questão mais complexa, em campo poderia, ainda, ser constatado que o valor de declividade corresponde a uma terceira classe diferente. Assim, as incertezas se multiplicam exponencialmente: erros de modelo para modelo e de modelos para o real.

Como indicativo da exatidão global para cada uma das classes de declividade testadas, a tabela 2 trás os resultados da matriz de confusão aplicada individualmente. Os resultados detalhados, classe a classe, indicaram um índice de concordância médio de apenas 58,2%. Por ser uma área pequena e bastante declivosa, os maiores índices de discordância foram computados para a classe de 0 a 3% de declividade, que, nesse caso, representam células mapeadas como erros espúrios. Dentre as 36 comparações efetuadas, a que obteve maior exatidão global foi a classe de declividade entre 20 e 45% na sobreposição entre os MDTs de 15m e 20m.

Tabela 2 – Comparação das classes de declividade dos MDTs sobrepostas pela matriz de confusão

MDTs comparados pela matriz de confusão	Exatidão global (porcentagem de concordância)					
	Classes de declividade (em %)					
	0 a 3%	3 a 8%	8 a 20%	20 a 45%	45 a 75%	> 75%
MDT 5m x MDT 10m	25.0	64.6	67.9	78.8	71.3	63.9
MDT 5m x MDT 15m	21.6	50.8	55.0	71.0	60.1	51.9
MDT 5m x MDT 20m	23.8	47.5	48.9	65.6	52.2	45.6
MDT 10m x MDT 15m	30.4	65.4	66.3	80.1	72.9	73.3
MDT 10m x MDT 20m	40.0	53.4	59.8	72.9	61.8	64.8
MDT 15m x MDT 20m	36.4	56.8	68.6	82.5	74.2	82.1

Essas considerações reforçam a importância de adequar os objetivos de mapeamento em função do MDT e parâmetros utilizados, considerando as limitações da modelagem e as margens de erros dos produtos finais. Daí a necessidade do rigor metodológico e da representação dos produtos cartográficos em escala condizente, ponderando sempre as imprecisões dos modelos.

Conforme representado, a mudança de tamanho de célula provoca muitas diferenças entre os mapas de declividade. Com o emprego cada vez mais frequente de Modelos Digitais de Elevação para a elaboração de mapeamentos temáticos, sobretudo ligados ao planejamento ambiental (com enfoque na legislação), os resultados obtidos demonstram que muitos cuidados, de ordem metodológica e analítica, devem ser tomados ao se trabalhar com classes determinísticas para fins específicos.

3.2 Comparação entre MDEs com distintas características de aquisição

Além das comparações entre MDTs *Topogrid* variando o tamanho de célula, também foram efetuadas análises com outros seis MDEs (SRTM90 v2, SRTM90 v4, SRTM30 v1, SRTM-X, Topodata e Aster GDEM) obtidos por métodos distintos, de mesma resolução ou não, para todo o recorte definido da área de estudo.

O primeiro teste realizado (cálculo do erro médio quadrático a partir dos pontos cotados das cartas topográficas) resultou em valores que variam de 0,9 metros, para o MDT *Topogrid*, até 12,64 metros, para o MDE SRTM-C v4 (tabela 3).

Tabela 3 – Erro médio quadrático dos MDEs

MDE	EMQ
Topogrid	0.90
SRTM30 v1	7.70
SRTM-X	7.82
Topodata	8.77
Aster GDEM	10.84
SRTM90 v2	11.23
SRTM90 v4	12.64

O erro médio abaixo de um metro para o MDT *Topogrid* se justifica pelo fato deste método considerar os pontos cotados como dado de entrada no processo de interpolação. Além disso, os outros MDEs possuem resolução maior, de 30 (*Topodata*, *Aster GDEM* e *SRTM-X*) e 90 (*SRTM-C v2* e *v4*) metros, o que influi diretamente no erro médio calculado pontualmente. Assim, estes resultados não têm o intuito de estimar a acurácia dos modelos com validação de campo, mas apenas ilustrar o erro médio quadrático em relação à base cartográfica utilizada.

Uma análise mais detalhada é apresentada pela tabela 4, com as 21 comparações possíveis entre os modelos sobrepostos, tanto para a altimetria quanto para a declividade, e com o cálculo do erro máximo, do erro médio e do desvio padrão.

Tabela 4 – Comparações estatísticas entre MDEs sobrepostos

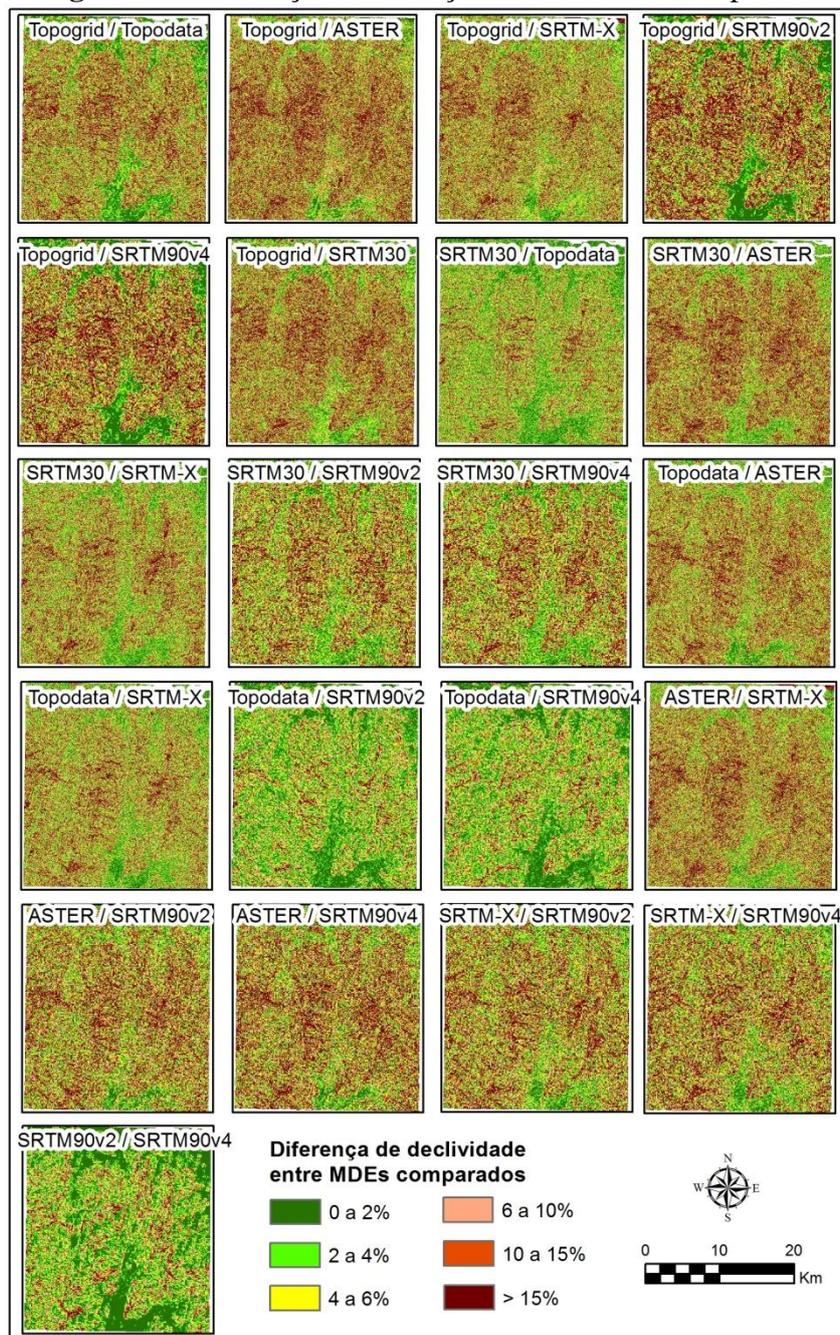
Comparação entre MDEs	Altimetria (m)			Declividade (%)		
	Erro máximo	Erro médio	Desvio padrão	Erro máximo	Erro médio	Desvio padrão
<i>Topogrid / Topodata</i>	134.5	9.76	8.76	163.2	7.66	8.25
<i>Topogrid / ASTER GDEM</i>	131	9.24	9.21	163.1	9.53	9.36
<i>Topogrid / SRTM-X</i>	297.5	7.02	7.88	429.3	7.59	9.03
<i>Topogrid / SRTM90 V2</i>	187.11	14.46	13.85	135.9	9.18	10.01
<i>Topogrid / SRTM90 V4</i>	188.6	12.65	12.34	131.8	9.18	9.96
<i>Topogrid / SRTM30 V1</i>	193.1	8.66	8.18	195.39	8.71	8.97
<i>SRTM30 V1 / Topodata</i>	110	5.01	5.37	145.9	5.3	6.06
<i>SRTM30 V1 / ASTER GDEM</i>	150	11.1	9.64	186.99	8.82	9.23
<i>SRTM30 V1 / SRTM-X</i>	288	6.42	7.07	446.38	6.57	8.58
<i>SRTM30 V1 / SRTM90 V2</i>	134	8.58	8.77	199.49	7.34	7.97
<i>SRTM30 V1 / SRTM90 V4</i>	154	9.23	10.57	187.93	7.47	8.15
<i>Topodata / ASTER GDEM</i>	150	10.66	9.1	156.7	7.89	8.02
<i>Topodata / SRTM-X</i>	281	7.21	7.53	431.4	6.39	8.08
<i>Topodata / SRTM90 V2</i>	104.5	5.65	5.44	87.7	4.39	4.72
<i>Topodata / SRTM90 V4</i>	86	6.62	7.54	107.2	4.5	4.98
<i>ASTER GDEM / SRTM-X</i>	286	7.98	8.18	437.9	8.1	9.69
<i>ASTER GDEM / SRTM90 V2</i>	159	9.46	7.95	159.4	8.37	8.53
<i>ASTER GDEM / SRTM90 V4</i>	219	13.97	13.15	145.1	9.11	9.26
<i>SRTM-X / SRTM90 V2</i>	214	8.1	8.15	283	7.96	8.92
<i>SRTM-X / SRTM90 V4</i>	226	9.93	10.59	434.8	7.98	9.55
<i>SRTM90 V2 / SRTM90 V4</i>	152	10.94	12.19	70.8	4.16	4.97

O erro máximo calculado pela diferença da elevação entre MDEs sobrepostos foi de 297,5 metros (*Topogrid* - *SRTM-X*). Embora o erro médio, nessa comparação, tenha sido de 7 metros, esse resultado ilustra os perigos das análises pontuais.

O maior erro médio resultante foi de 14,4 metros (*Topogrid* – SRTM90 v2) e o menor erro médio foi calculado na sobreposição entre o Topodata e SRTM-C v2, contabilizando 5,6 metros. Embora as resoluções dos MDEs sejam diferentes, o Topodata foi gerado a partir da interpolação por *krigagem* dos valores do SRTM90, o que explica esse baixo erro médio entre eles.

Referente aos erros altimétricos, além da própria resolução outros fatores podem influir nas diferenças de elevação: trajetória dos sensores, interferência de objetos na superfície (como copas de árvores) e métodos de interpolação e processamento. Algumas dessas características são evidenciadas visualmente pela figura 4, que trás a representação dos MDEs sobrepostos indicando as diferenças de elevação com padrões e/ou orientações destacadas.

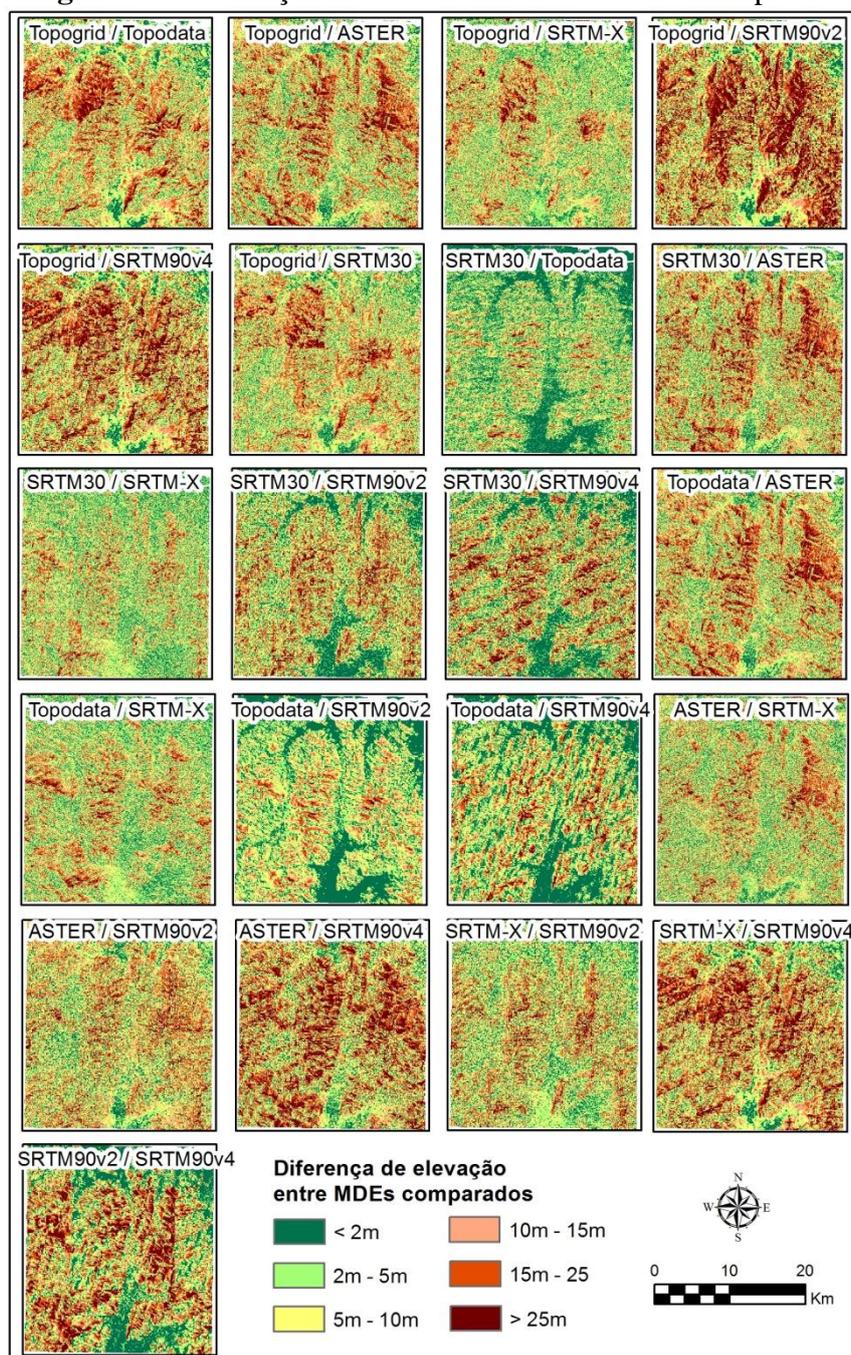
Figura 4 – Diferenças de elevação entre MDEs sobrepostos



A sobreposição das matrizes de declividade seguiu a tendência dos resultados computados para a altimetria. Os valores de declive chegaram à diferença de 480% entre o Aster GDEM e SRTM-X num mesmo ponto, e o maior erro médio foi 9,18% entre o Topogrid e ambos MDEs SRTM-C. O melhor resultado comparativo para a declividade foi entre o SRTM90 v2 e SRTM90 v4, com erro médio de 4,16%. De modo geral destaca-se que os erros médios de declive foram muito elevados, como ilustra a figura 5.

Associando estes resultados àqueles apresentados para a sub-bacia hidrográfica do rio Tingidor, salienta-se que todas essas comparações foram realizadas com o intuito de analisar, mesmo que de modo introdutório, alguns aspectos que constituem a complexa definição e adequação dos MDEs e, principalmente, aspectos associados às inúmeras variáveis inerentes que influem diretamente nos produtos e subprodutos (atributos topográficos) resultantes.

Figura 4 – Diferenças de declividade entre MDEs sobrepostos



4 CONCLUSÕES

As análises comparativas entre os MDEs permitiram destacar que, embora não haja como definir o modelo ideal e que todos, de um modo ou de outro, apresentam erros particulares, há possibilidades de reduzir as incertezas a partir do conhecimento prévio dos modelos, dos algoritmos empregados no cálculo de atributos topográficos derivados e dos parâmetros adotados na modelagem. Dessa forma, o reconhecimento das limitações e potencialidades se mostrou uma importante etapa que favorece a utilização dos MDEs para aplicações específicas e auxilia as discussões posteriores sobre os produtos obtidos.

Para o MDT *Topogrid* conclui-se que seu uso está condicionado às características da base cartográfica e que conforme novos cálculos são efetuados sobre o modelo (atributos topográficos primários e secundários) o erro tende a se propagar, embora a altimetria exponha pouca variação. Por esse motivo, o ponto-chave foi a definição do tamanho da célula, que num intervalo de apenas 15 metros (apoiado em proposições metodológicas) apresentou variação média de até 80% (correlação de 0,2), para valores contínuos, e de quase 25% de área, para os valores discretos.

Destaca-se, também, a necessidade do rigor metodológico e da adequação do fator de escala nas etapas iniciais de definição de critérios do emprego dos modelos. Assim, MDEs com resoluções grosseiras (MDEs globais, como SRTM e ASTER) aplicados para estudos em escala de detalhe podem resultar em cenários muito distintos daqueles previstos inicialmente, com baixa correlação na validação em campo, devido à generalização da grade. Por outro lado, o emprego de MDEs de resolução de detalhe (métricos ou submétricos) em estudos de pequena escala pode resultar em produtos com muitos ruídos, além de aumentar o tempo de processamento.

Por fim, ressalta-se que as discussões sobre as limitações e problemáticas associadas aos MDEs não acompanharam o desenvolvimento das técnicas de geoprocessamento, dos SIGs e, principalmente, das técnicas de aquisição dos modelos. Sobretudo nas duas últimas décadas, o enfoque das publicações se atém à aplicação enquanto a análise crítica metodológica é superficial ou inexistente. Dessa forma, ainda há muitas lacunas para estudos nessa temática que contemplem abordagens específicas dos MDEs, desde o processo de construção dos modelos até a obtenção e discussão dos produtos resultantes.

REFERÊNCIAS

CHAGAS, C. S.; FERNANDES FILHO, E. I.; ROCHA, M. F.; CARVALHO JÚNIOR, M.; SOUZA, N. C. Avaliação de modelos digitais de elevação para aplicação em um mapeamento digital de solos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.2, p.218–226, 2010.

DSG - Diretoria do Serviço Geográfico do Exército Brasileiro. **Cartas Topográficas**: folhas 2858-1 NE; 2858-1 SE; 2858-2 NO; e 2858-2 SO. Escala 1:25.000. DSG, 2002.

EL-SHEIMY, N.; VALEO, C.; HABIB, A. **Digital Terrain Modelling**: Acquisition, Manipulation and Applications. Artech House, Inc., Norwood-Massachusetts. 2005.

EMBRAPA - Empresa Brasileira e Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa produção de informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 2 ed. 306p, 2006.

EVANS, I. S.; HENGL, T.; GORSEVSKI, P. Applications in Geomorphology. In: HENGL, T.; REUTER, H. I. (eds.) **Geomorphometry - Concepts, Software, Applications**, Series Developments in Soil Science vol. 33, Amsterdam: Elsevier, pp. 497-526, 2009.

HENGL, T. Finding the right célula size. **Computers & Geosciences** **32**, 1283–1298, 2006.

HENGL, T.; MACMILLAN, R. A. Geomorphometry - A Key to Landscape Mapping and Modelling. In: HENGL, T.; REUTER, H. I. (eds.) **Geomorphometry - Concepts, Software, Applications**, Series Developments in Soil Science vol. 33, Amsterdam: Elsevier, pp. 433-460, 2009.

HORN, B. K. P. Hill shading and the reflectance map. **Proceedings of the IEEE**, n. 69, v.01, p. 14-47, 1981.

HUTCHINSON, M. F. Calculation of hydrologically sound digital elevation models. **Paper presented at Third International Symposium on Spatial Data Handling at Sydney**, Australia, 1988.

LI, Z.; ZHU, Q.; GOLD, C. **Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology**. Boca Raton: CRC Press, 2005.

MICELI, B. S.; DIAS, F. M.; SEABRA, F. M.; SANTOS, P. R. A.; FERNANDES, M. C. Avaliação vertical de modelos digitais de elevação (MDEs) em diferentes configurações topográficas para médias e pequenas escalas. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 63/01, pp.191-201, 2011.

MILLER, C. L.; LAFLAMME, R. A. The digital terrain model - theory and application. **Photogrammetric Engineering** **24** (3), 433–442, 1958.

NELSON, A.; REUTER, H. I.; GESSLER, P. DEM Production Methods and Sources. In: HENGL, T.; REUTER, H. I. (eds.) **Geomorphometry: Concepts, Software, Applications**. Series Developments in Soil Science vol. 33, Amsterdam: Elsevier, pp. 31-64, 2009.

OKA-FIORI, C., SANTOS, L.J.C., CANALI, N.E., FIORI, A.P., SILVEIRA, C.T., SILVA, J.M.F., ROSS, J.L.S. **Atlas Geomorfológico do Estado do Paraná**: escala base 1:250.000, modelos reduzidos 1:500.000. Curitiba, MINEROPAR, 2006.

PIKE, R. J.; EVANS, I., HENGL, T. Geomorphometry: A Brief Guide. In: HENGL, T.; REUTER, H. I. (eds.) **Geomorphometry - Concepts, Software, Applications**, Series Developments in Soil Science vol. 33, Amsterdam: Elsevier, pp. 3-30, 2009.

SANTOS, L.J.C.; OKA-FIORI, C.; CANALI, N.E.; FIORI, A.P.; SILVEIRA, C.T.; SILVA, J.M.F.; ROSS, J.L.S. Mapeamento geomorfológico do Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. **Ano 7, n°2**, p. 3-12, 2006.

SILVEIRA, C. T.; FIORI, A. P.; FERREIRA, A. M.; GÓIS, J.R.; MIO, G.; Silveira, R. M. P.; MASSULINI, N. E. B.; LEONARDI, T. M. H. Emprego de atributos topográficos no mapeamento da susceptibilidade a processos geoambientais na bacia do rio Jacaré/Paraná. **Sociedade & Natureza (UFU. Online)**, v. 24, p. 623-639, 2013.

SILVEIRA, R. M. P.; SILVEIRA, C. T.; OKA-FIORI, C. Análise digital do relevo empregada no mapeamento de unidades geomorfológicas. **Revista Geografar**, v.7, n.2, p.43-68, 2012.

TARBOTON, D. G. A New Method for the Determination of Flow Directions and Contributing Areas in Grid Digital Elevation Models. **Water Resources Research**, **33(2)**: 309-319, 1997.

VALERIANO, M.M. **Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, p. 1-72, 2004.

VINK, A. **Land Use in Advancing Agriculture**, vol. X. Springer, New York, NY, 394pp, 1975.

ZEVENBERGEN, L. W.; THORNE, C. R. Quantitative Analysis of Land Surface Topography. **Earth Surface Processes and Landforms**, v.12, p.47-56, 1987.

ZHOU, Q.; LEES, B.; TANG, G. (eds.). **Advances in Digital Terrain Analysis**. Series: Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. Berlin: Springer-Verlag, 2008.

Data de submissão: 20.01.2015

Data de aceite: 06.08.2015

License information: This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.