

Revista Brasileira de Cartografia (2015) N<sup>o</sup> 67/3: 603-620  
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto  
ISSN: 1808-0936

## **ANÁLISE QUALITATIVA E COMPARATIVA DAS VARIÁVEIS MORFOMÉTRICAS DA REGIÃO SERRANA DA PORÇÃO SUL DO MACIÇO CENTRAL DO CEARÁ GERADAS ATRAVÉS DOS MDE: SRTM, ASTER GDEM E TOPODATA**

*Qualitative and Comparative Analysis of the Morphometric Variables of the  
Mountain Region of the South Portion of the Massif Central in Ceará Generated  
Through MDE: SRTM, ASTER GDEM, and TOPODATA*

**Alcione Moreira do Carmo, Michael Vandesteem Silva Souto &  
Cynthia Romariz Duarte**

**Universidade Federal do Ceará – UFC  
Programa de Pós-Graduação em Geologia**

Campus do Pici, Departamento de Geologia, Bloco 912. Fortaleza/CE, CEP 60455-760, Brasil  
alcione.moreira@gmail.com, {michael.souto, cynthia.duarte}@ufc.br

*Recebido em 09 de Fevereiro, 2014/ Aceito em 10 de Maio, 2014  
Received on February 09, 2014/ Accepted on May 10, 2014*

### **RESUMO**

Com o avanço da informática nas últimas décadas houve também o avanço no armazenamento de banco de dados digitais espaciais e a facilidade de acesso e obtenção destes dados na rede mundial de computadores. Modelos digitais de elevação do terreno, por exemplo, que antes eram dados complexos e de difícil acesso, atualmente estão disponíveis gratuitamente na internet em diversas resoluções e acurácias para todo o globo terrestre. Muitos trabalhos desenvolvidos no meio científico utilizam os modelos digitais de elevações (MDE) para os mais diversos tipos de análises espaciais do terreno, porém poucos atentaram em verificar a qualidade dos dados e dos produtos obtidos através desses modelos que pudesse indicar qual é o melhor para um determinado tipo de análise ou o melhor resultado que possa apresentar para uma determinada escala de trabalho. Com base nestes questionamentos, este trabalho realizou uma análise qualitativa e comparativa de três MDE mais comumente empregados, por estarem disponíveis na internet (ASTER-GDEM, SRTM e TOPODATA). Estes modelos foram submetidos a uma série de processamentos em ambiente SIG para extrair e analisar diversas variáveis geomorfológicas e hidrológicas, como a declividade do terreno, as orientações das vertentes e as curvaturas verticais e horizontais, em três escalas distintas. Para isso, foi definida uma área-piloto situada geomorfologicamente nas serras da porção Sul do Maciço Central do Estado do Ceará, mais precisamente localizada entre os municípios de Acopiara, Mombaça e Piquet Carneiro. Os resultados obtidos por meio das análises qualitativa e comparativa entre os três tipos de MDE apresentaram respostas distintas entre si, principalmente devido à resolução espacial dos dados, que reflete no maior ou menor detalhamento da morfologia do terreno, bem como no destaque das linhas e dos sentidos de fluxos pelas curvaturas horizontais e verticais obtidas em cada escala analisada.

**Palavras-chave:** Geomorfologia, MDE, SRTM, ASTER-GDEM, TOPODATA, Variáveis Morfométricas.

## ABSTRACT

With the advancement of computer technology in recent decades came along the advancement of digital data and the ease of obtaining this information gathering from the World Wide Web. Digital models of ground elevations, for example, which generated data of complex and difficult access some years ago, are now available freely on the internet in different resolutions and accuracies for the entire globe. Many works developed in the scientific community use digital elevation models (DEM) for various types of analyses which are interested in searching, but few heeded to verify the quality of data and products obtained through these models which could indicate the best one for a particular type of analysis or may exhibit a better result for a given working range. Based on these questions, this study was designed to make a qualitative and comparative analysis of the three more available DEM (ASTER-GDEM, SRTM, and TOPODATA) on the internet, where they underwent a series of processes in a GIS environment to extract and analyze numerous geomorphological and hydrological variables such as land slope, the slope aspect and the profile and plan curvature at three different scales. For this, a pilot area located in the mountains of the South portion of the Central Massif from the State of Ceará, more precisely located between the cities of Acopiara, Mombaça, and Piquet Carneiro was defined. The results obtained by means of qualitative and comparative analysis among the three types of MDE generated different answers from each other, primarily in relation to the spatial resolution of the data, which reflects greater or lesser details of the morphology of the terrain, as well as in highlighting the lines and directions of flows by the horizontal and vertical curves obtained for each analyzed scale.

**Keywords:** Geomorphology, DEM, SRTM, ASTER-GDEM, TOPODATA, Morphometric Variables.

## 1. INTRODUÇÃO

Os modelos digitais de elevação (MDE) são ferramentas de estudo do terreno e de análises das variáveis geomorfológicas e hidrológicas, fornecendo informações básicas para caracterizar os atributos topográficos do terreno. Através deles podemos gerar parâmetros de análise morfométrica primários, como declividade, orientação de vertentes (OKSANEN e SARJAKOSKI, 2005; RAAFLAUB & COLLINS, 2006), curvaturas verticais e horizontais, linhas de fluxos, altitudes (WILSON & GALLANT, 2000), rede de drenagem, entre outros derivados (relevo sombreado, curvas de níveis e até lineamentos estruturais) utilizando-se de *softwares* específicos.

De acordo com Wilson (2012), a Geomorfometria Moderna consiste em extrair através da topografia digital, parâmetros da superfície da Terra e suas características espaciais. A utilização das principais variáveis morfométricas é de grande relevância para análise das formas de relevo e de sua evolução. Esse assunto tem sido largamente discutido no âmbito de sua eficácia no estudo da Geomorfologia Moderna, que utiliza ferramentas tecnológicas e estatísticas para dar suporte ao estudo das formas de relevo terrestre.

As variáveis como declividade, orientação de vertentes, curvaturas verticais e horizontais

têm sido utilizadas como ferramentas de análise em várias áreas da Geociências para entender a dinâmica dos processos de evolução das paisagens (OZDEMIR, 2011) e de bacias hidrográficas (HE *et al.*, 2012; GREVE *et al.*, 2012; QIN *et al.*, 2009). Para Kawabata e Bandibas (2009) as variáveis morfométricas aliadas à Geologia podem ser excelentes ferramentas de delimitação das áreas de catástrofes ambientais, como os deslizamentos de terra, principalmente em áreas serranas mais degradadas.

Atualmente são disponibilizados vários produtos MDE com melhor resolução espacial e acurácia topográfica, dentre eles alguns são oferecidos gratuitamente na internet: SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), ASTER-GDEM (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer – Global Digital Elevation Model*) e TOPODATA (Tratamento dos dados SRTM realizados pelo Projeto Topodata do Instituto de Pesquisas Espaciais – INPE).

Os produtos MDE supracitados foram utilizados para análise qualitativa e comparativa entre eles, de forma a avaliar suas diferenças e as escalas que melhor se adequem para análise geomorfológica. Para isso, foram escolhidos três níveis de escala de trabalho (1:100.000, 1:50.000 e 1:25.000), que são amplamente utilizadas em diversos tipos de trabalho, principalmente

aqueles que são aplicados para a identificação e interpretação das variáveis morfométricas de área de relevo montanhoso. Logo, foi escolhida uma área-piloto para aplicação deste estudo, localizada na porção sul do Maciço Central, no Estado do Ceará, Nordeste do Brasil.

### 1.1 Localização e Vias de Acesso da Área Pesquisada

A área-piloto pesquisada está situada na região Centro Sul do Estado do Ceará, compreendida entre os municípios de Acopiara, Mombaça e Piquet Carneiro, onde se encontra o conjunto de serras da porção sul do Maciço Central do Ceará, tendo como feições principais as serras do Maia, do Fonseca, do Flamengo e de São Miguel (Figura 1).

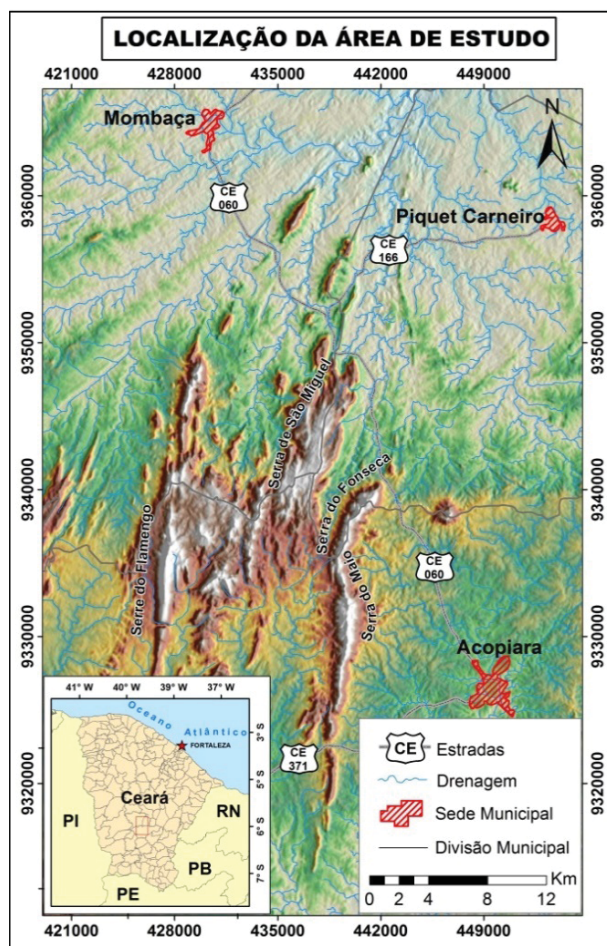


Fig. 1 - Mapa de localização da área de estudo adaptado a partir do MDE Topodata.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS APLICADOS

Atualmente já existem MDE disponíveis gratuitamente com resolução espacial de 30m,

como obtida nas imagens ASTER-GDEM e de 90m para as imagens SRTM, que não dependem da fotogrametria e de interpolação de pontos planoaltimétricos e coletados em campo. No entanto, esses dados não estão livres de erros (ARNOLD, 2010). Os dados utilizados no trabalho foram adquiridos gratuitamente na rede mundial de computadores, como o SRTM e ASTER-GDEM, que estão disponíveis pelo *site* da USGS (*United States Geological Survey*) em <<http://earthexplorer.usgs.gov/>> e o TOPODATA em <<http://www.webmapit.com.br/inpe/topodata/>>.

### 2.1 SRTM

O Programa *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM) foi uma missão realizada pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), em parceria com a *National Imagery and Mapping Agency* (NIMA), a Agência Espacial Alemã (DLR) e a Agência Espacial Italiana (ASI), cujo objetivo principal era gerar um modelo de elevação para todo o globo terrestre com alta precisão, por meio da obtenção de dados SAR (radar de abertura sintética), que estava a bordo do ônibus espacial Endeavour. Esta missão teve a duração de 11 dias, sendo realizada entre os dias 11 a 22 de fevereiro de 2000 (FARR *et al.*, 2007; FONI e SEAL, 2004).

A partir desses dados coletados foi feito o MDE para aproximadamente 80% do globo terrestre, numa área limitada entre as latitudes 60° N e 54° S (PIERCE *et al.*, 2006), adquiridos por meio de técnica interferométrica, usando duas antenas refletoras separadas 60m uma da outra, onde os sensores RADAR operavam nas bandas C e X (JAKOB e VAN, 2001). Cada pixel da imagem é representado por um número complexo que contém a amplitude do sinal de retorno e a sua fase, possibilitando o cálculo da elevação topográfica do terreno.

Após recobrir todo o globo terrestre, os 12 TB de dados obtidos durante a missão foram processados para gerar o MDE com precisão vertical absoluta de  $\pm 16m$ , e relativa de  $\pm 10m$  (RABUS *et al.*, 2003), resolução espacial de 1 arco-segundo para os Estados Unidos, o que dá aproximadamente cerca de 30m de resolução espacial, e 3 arcos-segundo para o restante do mundo, que corresponderia uma

resolução espacial de 90m. Os dados SRTM estão configurados no sistema de Coordenadas Geográficas e pelo *Datum* WGS-84 (SUN *et al.*, 2003).

## 2.2 TOPODATA

O Projeto TOPODATA foi desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), e visou melhorar a resolução espacial de 3 arcos-segundo para 1 arco-segundo os dados SRTM da NASA, através do método de Krigagem, corrigindo as imperfeições e preenchimento de falhas (VALERIANO e ROSSETTI, 2012). Isso foi possível por meio da aplicação de uma série de processamentos nos dados STRM para minimizar distorções locais e ruídos existentes nos dados brutos da NASA.

O MDE gerado pelos dados TOPODATA, bem como demais produtos derivados (declividade, orientação, curvatura vertical, curvatura horizontal, relevo sombreado e outros) estão estruturados em quadrículas compatíveis com a articulação de cartas topográficas na escala 1:250.000 do Brasil (VALERIANO, 2004) O MDE da área de estudo em questão disponibilizado pelo projeto TOPODATA estava sem referência espacial, logo foi necessário colocar a projeção desta imagem para o padrão do Sistema de Coordenadas utilizadas nas demais imagens analisadas neste trabalho.

## 2.3 ASTER-GDEM 2

Os dados ASTER-GDEM foram desenvolvidos pela parceria entre NASA e *Ministry of Economy, Trade, and Industry* (METI) do Japão por meio da aquisição das imagens do sensor ASTER – sensor passivo acoplado ao satélite Terra – *Earth Observing System* (EOS), com o intuito de melhorar a resolução espacial e a acurácia dos dados altimétricos. As referidas imagens foram captadas em pares, cujas cenas são de tamanho 60 x 60km, para aplicação da técnica de estereoscopia digital e extração dos dados altimétricos (TACHIKAWA *et al.*, 2011). Os dados ASTER-GDEM contemplam parte do globo terrestre entre as latitudes de 83° N e 83° S.

Os produtos GDEM 2 são a versão melhorada em relação ao GDEM 1, onde foi aplicado uma máscara de água para corrigir

os erros em locais onde existiam ruídos nos dados pela interferência nos valores por causa dos corpos de água. A imagem GDEM 2 apresenta resolução espacial de 75m e precisão de 17m com 95% de confiabilidade, esses dados estão colocados em uma grade de 1 arco-segundo (aproximadamente 30m na Linha do Equador) disponibilizados já na referência do Sistema de Coordenadas Geográfica e *Datum* WGS-84 (ERSDAC, 2011). Os arquivos são disponibilizados em formato GeoTIFF (*Tagged Image File Format*).

## 2.4 Processamento dos Dados

Os processamentos dos dados foram realizados com *software* de PDI para mosaicar as imagens, e com *software* de SIG (ArcGIS® v9.3) para executar as devidas análises e integração das informações. Para chegar a um resultado comparável todas as imagens foram submetidas ao mesmo processamento, que foi executado em distintas etapas.

O primeiro passo no desenvolvimento do trabalho foi a aquisição das imagens, obtidas gratuitamente via internet, as quais tiveram que ser mosaicadas para cobrir toda região de estudo. Posteriormente, essas imagens mosaicadas foram recortadas no tamanho exato da área pesquisada. A segunda etapa consistiu na correção dos dados e preenchimento dos *pixels* sem informações e na projeção e reprojeção cartográfica de todas as imagens, pois teriam que estar tanto em coordenadas geográficas como em coordenadas planas (sistema UTM) para execução das análises morfométricas (curvaturas vertical e horizontal em coordenadas geográficas e declividade e orientação de vertentes em UTM).

Os cálculos de todas variáveis foram realizados automaticamente em ambiente SIG, por meio do *software* ArcGIS®, utilizando a ferramenta 3D *Analyst*. O cálculo da declividade (D) em porcentagem foi feito com base na equação (1), que corresponde a razão de dV (distância vertical) e dH (distância horizontal), multiplicado por 100 para dar o valor percentual. Seis classes de declividade em porcentagem foram definidas.

$$D = (dV/dH) * 100 \quad (1)$$

A orientação de vertentes (OV) foi obtida a partir de janelas móveis 3x3, utilizando um algoritmo que calcula os valores das oito células vizinhas para determinar o valor da célula central. Tomando como base a taxa de mudança de direção de X e Y para cada célula a orientação de vertentes foi calculada usando a equação (2). Posteriormente, o resultado dessa operação é então convertido em valores de direção da bússola (0-360 graus).

$$OV = 57,29578 * \text{atan2} ([dz/dy], - [dz/dx]) \quad (2)$$

Durante a manipulação dos dados percebeu-se que a declividade e a orientação apresentaram melhores resultados a partir do cálculo do MDE com projeção UTM, pois como os valores são tratados na unidade métrica, isto possibilitou que os resultados apresentados mostrassem áreas mais visivelmente delimitadas na comparação com os dados na projeção geográfica. As curvaturas vertical e horizontal (Z) são obtidas a partir do cálculo que utiliza janelas móveis 3x3, onde aplica-se a adaptação de um polinômio quadrático para cada célula (FENG e BAJCSY, 2005; MOORE *et al.*, 1991), como mostra a expressão matemática (3) abaixo:

$$Z = Ax^2y^2 + Bx^2y + Cxy^2 + Dx^2 + Ey^2 + Fxy + Gx + Hy + I \quad (3)$$

As derivadas das curvaturas verticais e horizontais apresentaram resultados significativos apenas nas operações realizadas a partir dos arquivos com coordenadas geográficas. Os mapas confeccionados para análise das variáveis morfométricas nas três escalas (1:100.000, 1:50.000 e 1:25.000) foram gerados para testar a relação resolução *versus* escala e então foi feita a comparação dos resultados.

### 3. ANÁLISES E DISCUSSÕES

Gerar parâmetros morfométricos digitais a partir do MDE em *software* de SIG requer alguns cuidados quanto à resolução do produto utilizado e da escala de trabalho que se deseja usar (DRĂGUT e EISANK, 2011). Tendo como base os mapas derivados de um mesmo produto (MDE)

em várias escalas, pode-se avaliá-los com relação às resoluções das imagens originais, e assim observar os detalhes dos resultados visualizados.

Saber a precisão cartográfica dos MDE utilizados como base para calcular as variáveis morfométricas é importante para entender a precisão das feições geradas para análise do terreno. Os MDE TOPODATA, ASTER-GDEM e SRTM, tiveram seu Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) calculados e apresentados em alguns trabalhos, como os de Medeiros *et al.* (2009), Dias *et al.* (2011) e Moura *et al.* (2014), onde nesses trabalhos foi permitido enquadrar os referidos MDE em padrões de classes de exatidão cartográfica de acordo com as escalas de 1:100.000 e 1:50.000.

Então, a morfometria, por ter uma aplicação mais precisa da forma do terreno, necessita do apoio de mapas mais detalhados com escalas maiores que 1:100.000, onde se pode ter maiores detalhes a níveis locais, como a declividade da encosta, a forma e a orientação da vertente e a direção dos cursos dos fluxos. Por isso, a análise foi aplicada para as escalas em semi-detulhe (1:100.000, 1:50.000) e detalhe (1:25.000), pois são escalas amplamente utilizadas para execução de mapeamentos e análises morfométricas por multiusuários, e avaliar esses limites possibilitaria que os usuários escolhessem os melhores MDE de acordo com sua aplicação morfométrica.

#### 3.1 Declividade

O estudo da declividade é de fundamental importância para análise da geomorfologia, e quando associada à pedologia, à cobertura vegetal e a outros fatores (como o clima e orientação das vertentes), pode-se inferir os riscos de desmoronamentos ou deslizamentos de terras, auxiliando assim no planejamento e na prevenção de desastres naturais. Dependendo do grau de declividade é possível prever o tipo de erosão e o uso do solo. A declividade é definida como o ângulo de inclinação da superfície do terreno em relação a um plano horizontal com valores variando de 0° a 90°, embora seja mais expressa em porcentagem, de zero a infinito (VALERIANO, 2008).

O escoamento e a infiltração possuem uma forte relação com a declividade do terreno, e associada à litologia, tipo de solos, cobertura vegetal, precipitação de chuva e outros fatores morfológicos podem indicar um grau maior ou menor da probabilidade do risco de erosão das vertentes (PRADHAN, 2010). As declividades menos acentuadas favorecem a infiltração, portanto diminuem o risco de erosão dos solos. Os critérios utilizados para a classificação de declividade no presente trabalho foi o mesmo adotado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), que determinou seis classes de declividade, considerando o nível de inclinação do terreno em: Plano 0 - 3%; Suave Ondulado 3 - 8%; Ondulado 8 - 20%; Forte Ondulado 20 - 45%; Montanhoso 45 - 75%; e Escarpado acima 75% (EMBRAPA, 2006). A análise dos resultados foi feita por escala, e pode-se dizer que de forma geral existem similaridades entre os três MDE (Figura 3), apesar de que em alguns locais as imagens produzidas apresentaram diferenças de declividade. Ou seja, representaram a morfologia do terreno com pequenas variações em função da diferença de qualidade entre os modelos avaliados.

Em termos quantitativos, os produtos de declividade gerados a partir dos MDE TOPODATA, SRTM e ASTER-GDEM apresentaram distribuição de valores diferentes entre si, como mostrados nos histogramas das imagens de declividade (Figura 2), onde os valores máximos de declividade variaram entre as imagens: 111,13% para o TOPODATA (Figura 2A), 77,84% para o SRTM (Figura 2B) e 269,43% para o GDEM (Figura 2C). Isso ocorre porque os valores de declividade dados em porcentagem tendem ao infinito e essas discrepâncias de valores entre as imagens refletem o grau de detalhamento da topografia para os valores acima de 75%. Com relação à média dos valores de declividade nos três MDE ela fica equilibrada em todos os MDE avaliados, estando sempre aproximada em 8% de declividade (Figura 2). Isso indica que 50% dos valores de declividade do terreno estão entre 0-8% e os outros 50% estão distribuídos num relevo com declividades mais acentuadas, acima dos 8%, o que condiz com as características geomorfológicas reais do terreno analisado.

Na escala de 1:100.000 pôde-se observar que de forma geral as imagens dos modelos SRTM e TOPODATA apresentaram alta semelhança das classes de declividade, principalmente para as classes Ondulado e Forte Ondulado (Figura 3A). A imagem produzida pelo GDEM-2 também apresentou similaridades de relevo para essas classes de declividade, porém para as classes com valores inferiores a 20% (Plano, Suave Ondulado e Ondulado) as informações foram mais difusas, não apresentando uma uniformidade nas classes, impossibilitando destacar as direções do relevo. Para valores de declividade maiores que 75% (Escarpado), ressaltaram mais picos de elevações que nos demais modelos (Figura 3A). Nos modelos gerados na escala de 1:50.000, foram identificadas as mesmas situações vistas na escala 1:100.000, entretanto, pode-se destacar que houve uma perda de qualidade na resolução espacial da imagem SRTM, quando comparada com a imagem TOPODATA, que manteve a suavidade nas curvas das classes de declividade modeladas (Figura 3B). Na imagem GDEM, os problemas de difusão dos valores inferiores a 20% nas classes de declividade continuaram de forma até mais evidente e destacaram grande quantidade de áreas na classe Plano, talvez ocorreu devido a aplicação da máscara de água nessas áreas mais planas, onde os valores topográficos tendem a zero. As classes com valores acima de 45% foram variando na quantidade de área ocupada, dando destaque para a classe Escarpado que detalharam os níveis mais íngremes da região estudada (Figura 3B).

Nas observações feitas em escala 1:25.000, pode-se ressaltar que a imagem gerada pelo SRTM não favoreceu uma análise de qualidade para declividade do terreno, pois os *pixels* não mostraram com clareza as informações requisitadas. Já na imagem TOPODATA a qualidade do produto gerado foi mantida, mesmo com a mudança de escala. Para a imagem produzida pelo GDEM a inconformidade dos dados atingiu até os valores de classe de declividade inferiores a 45%, que antes não estava clara nas análises das escalas anteriores. Pôde-se ainda observar pelos valores acima de 75% que o GDEM está próximo do limite da escala de análise, pois os *pixels* começaram a se destacar (Figura 3B).

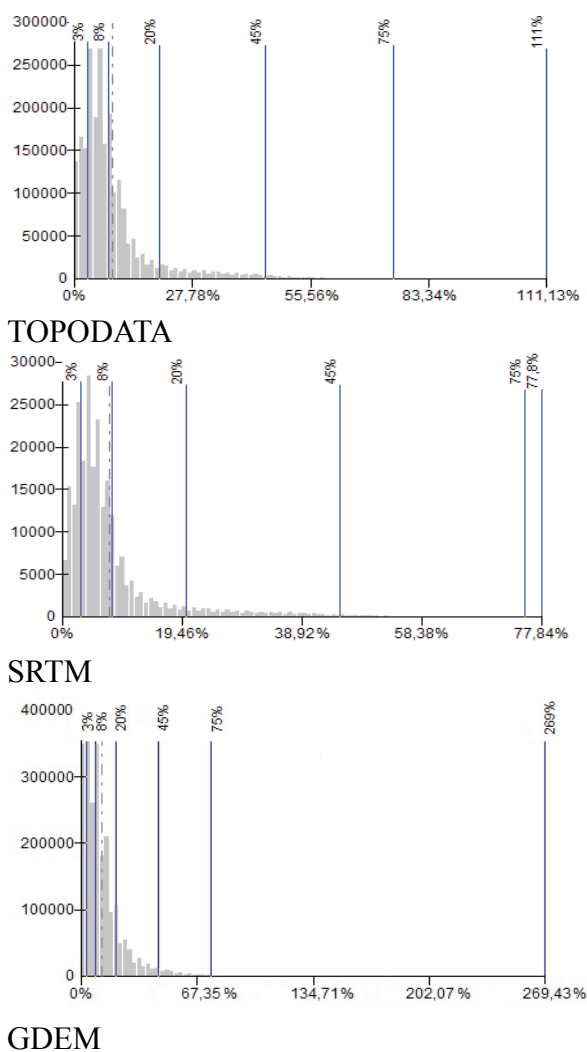


Fig. 2 - Histogramas representando a estatística das informações de declividade para os três MDE avaliados: (A) TOPODATA, (B) SRTM e (C) GDEM. Os valores máximos estão destacados em vermelho e a média está tracejada.

### 3.2 Orientação de Vertentes

A orientação de vertentes é uma variável importante para entender a direção das linhas de fluxos de água e sedimentos. Através da definição da orientação desses fluxos podemos prever a direção de deslocamento dos movimentos gravitacionais. De acordo com Oliveira (1984) a orientação das vertentes também possui uma correlação com o clima e o grau de insolação em decorrência do movimento do sol durante o dia.

Diferentes posições de vertentes em determinadas regiões recebem umidade variável, favorecendo a diferenciação do intemperismo,

da erosão, dos tipos de solos e da formação vegetal. Tal fato, associado ao grau de inclinação do terreno e à geologia, pode explicar a diferenciação de paisagens que pertencem à mesma formação geomorfológica, porém possui morfometria distinta, como no caso da serra do Fonseca, que possui vertentes orientadas em várias direções, refletindo na diferenciação da paisagem no local.

A metodologia para obtenção dessa variável mudou com o avanço da computação, que anteriormente era uma tarefa bem trabalhosa. O cálculo da orientação de vertente ou *aspect* em ambiente SIG é bem mais simples hoje em dia. Os MDE são bases bem eficientes para obtenção dos valores de direções das vertentes.

Os três modelos SRTM, GDEM e TOPODATA utilizados para o cálculo da orientação de vertentes apresentaram resultados similares no tocante à direção das vertentes quando analisados na escala de 1:100.000, que apresentaram direcionamento principal nas direções WNW e ESE (Figura 5A), porém em relação ao detalhamento das informações apresentadas nas demais escalas (1:50.000 e 1:25.000) os resultados foram bem diferentes entre eles (Figuras 5B e 5C). Este direcionamento principal das vertentes reflete o *trend* preferencial de NNE-SSW, no qual o conjunto de serras da região está orientado.

Analisando os dados estatísticos da orientação de vertentes dos três MDE verificou-se nos histogramas que há uma variação de frequência entre os modelos avaliados (Figura 4), que pode estar condicionada ao grau de detalhamento dos dados. Além de que em dois modelos apresentaram duas modas de distribuição de valores, para os modelos TOPODATA (Figura 4A) e SRTM (Figura 4B), que refletem bem os *trends* preferenciais de orientação das vertentes (NW-SE) e que denotam o alinhamento preferencial das serras NE-SW. O histograma do GDEM não distingue bem mesmo *trend* de orientação preferencial (Figura 4 C), isso porque a distribuição dos dados está posta de forma caótica, que não ajudam na interpretação visual.

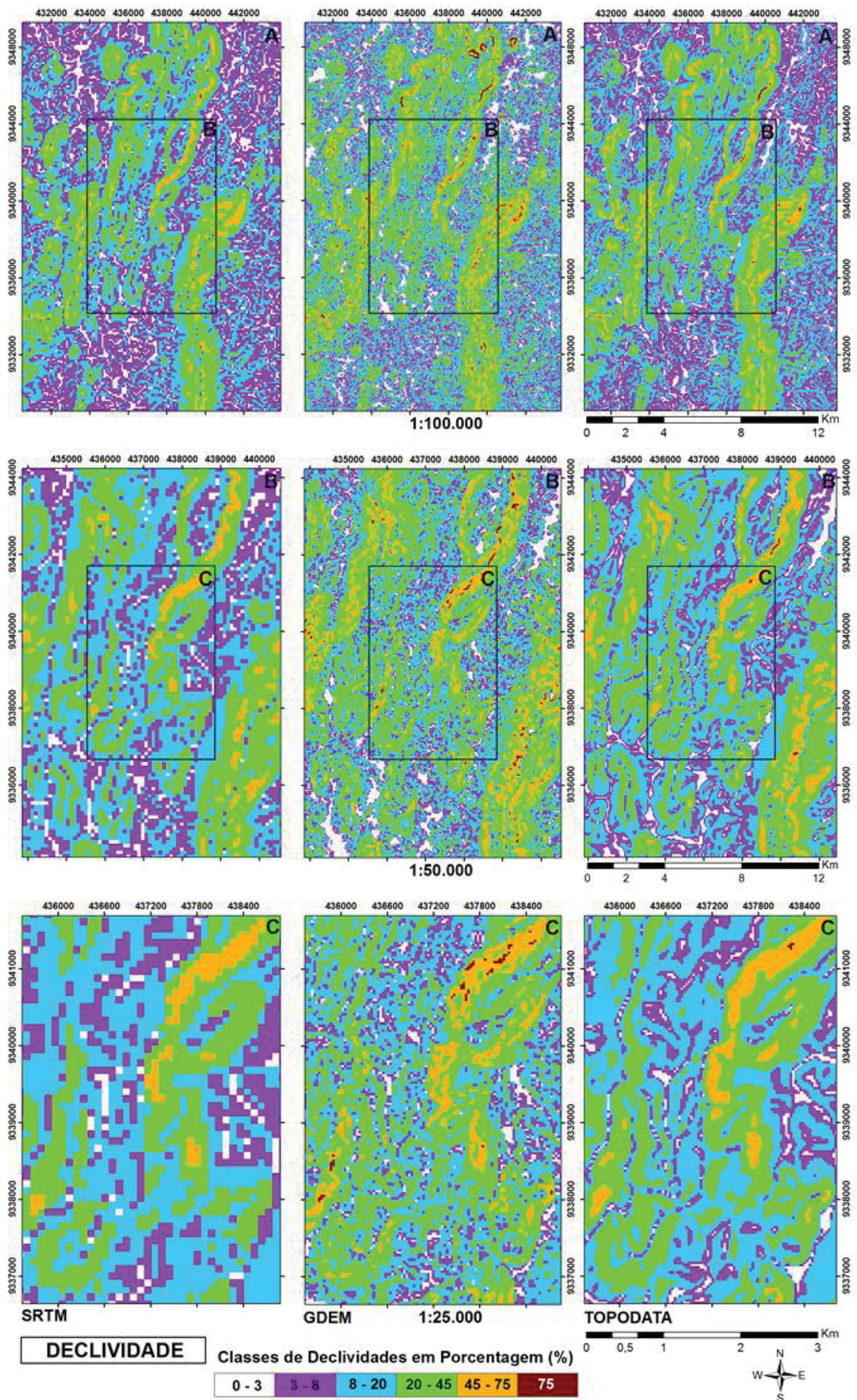


Fig. 3 - Mapa de declividade nas escalas de (A) 1:100.000, (B) 1:50.000 e (C) 1:25.000, utilizando como base os MDE SRTM, GDEM, TOPODATA.



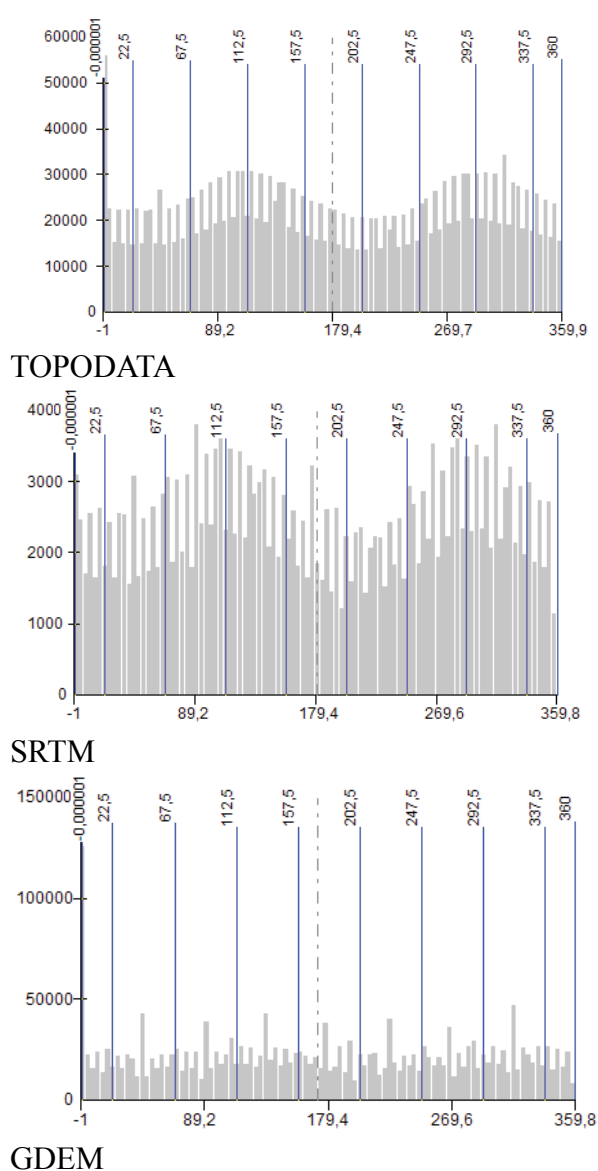


Fig. 4 – Histogramas representando a estatística das informações de orientação de vertentes para os três MDE avaliados: (A) TOPODATA, (B) SRTM e (C) GDEM. A média está tracejada.

Na comparação dos produtos de MDE na escala de 1:100.000 foi possível perceber que as imagens geradas do SRTM e TOPODATA foram mais semelhantes, diferindo-se na quantidade de áreas planas originadas, com o SRTM mostrando um número quase insignificante dessas feições (Figura 5A). Já o produto GDEM apresentou grande quantidade dessas informações, que se assemelham com alguns lineamentos das porções planas vistas no TOPODATA, principalmente na parte ao norte da área estudada (Figura 5A).

Na escala de 1:50.000 a imagem gerada pelo produto SRTM apresentou um início de perda da resolução, com os *pixels* começando a ser ressaltados na imagem, porém percebe-

se a forte similaridade dos resultados quando comparados com a imagem do TOPODATA (Figura 5B). No MDE do GDEM observou-se que há informações mais detalhadas das orientações de vertente, refletindo melhor a rede de drenagem existente na área pesquisada. Os aspectos gerados a partir do TOPODATA foram os mais bem delineados, representando apenas as vertentes mais significativas para esse nível de detalhamento (Figura 5B).

A avaliação feita na comparação dos produtos MDE na escala 1:25.000 mostrou que os resultados foram bem diferentes entre os três analisados. A imagem SRTM não é a mais adequada para analisar as orientações de vertente neste nível de escala, pois a resolução da imagem ficou muito ruim, dificultando a visualização das feições (Figura 5C). As imagens do GDEM e do TOPODATA apresentaram melhores resultados visuais, porém já estão no limite da resolução da imagem, com os *pixels* começando a se tornar visíveis, dificultando uma melhor análise, como foi o caso da imagem do GDEM, apesar do maior detalhamento das vertentes. Já a imagem do TOPODATA originou feições mais delimitadas, facilitando a distinção e classificação dos sentidos das principais orientações de vertentes (Figura 5C).

### 3.3 Curvatura Horizontal

A curvatura horizontal indica padrões de divergência ou convergência das linhas de fluxos (água, sedimentos, minerais e matéria orgânica). Normalmente essas linhas podem ser planares representada por valores nulos, convergentes por valores negativos e divergentes por valores positivos (DUMAS *et al.*, 2010). A curvatura horizontal é uma importante variável do escoamento superficial, pois se pode prever a expansão da drenagem e suas possíveis consequências de alagamento. Se associada a outras variáveis como curvatura vertical e declividade, a curvatura horizontal exerce um importante controle sobre a vazante dos fluxos superficiais (HILBERTS *et al.*, 2004).

O caráter divergente da curvatura mostra o alargamento das linhas de fluxos, podendo indicar topografia mais suave ou vales abertos, e o aspecto convergente sugere um estreitamento dos caminhos do escoamento formando vales mais fechados. A aplicação da curvatura

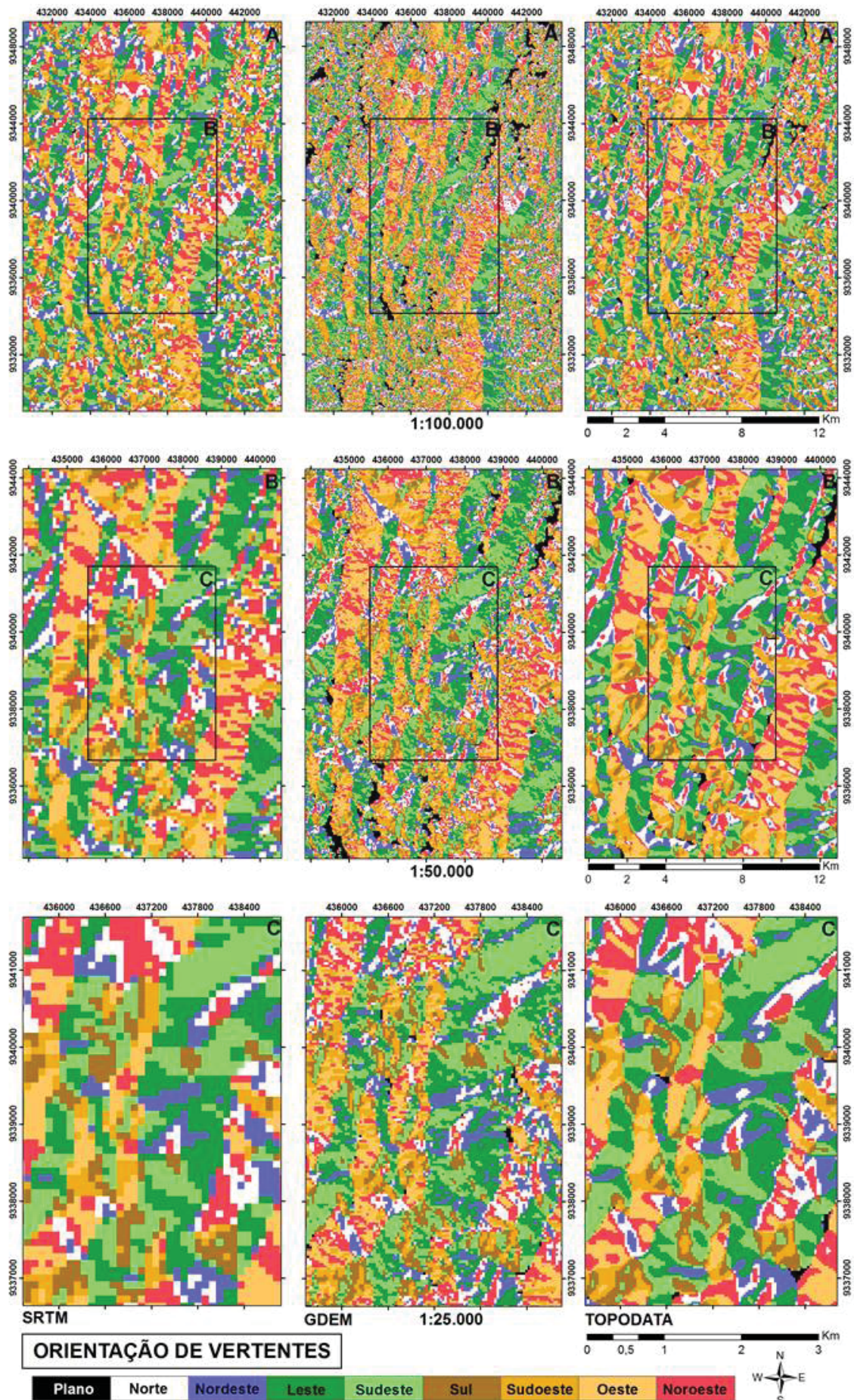


Fig. 5 - Mapa de Orientação de Vertentes nas escalas de (A) 1:100.000, (B) 1:50.000 e (C) 1:25.000, utilizando como base os MDE SRTM, GDEM, TOPODATA.

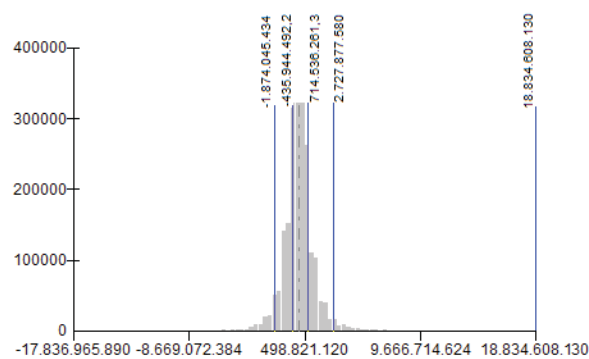
horizontal não é adequada a áreas extensas, ou seja, a aplicação dessa variável é interessante em áreas pequenas representadas em escala de detalhe (VALERIANO, 2008).

De acordo com os dados estatísticos analisados por meio dos histogramas dos três MDE, podemos avaliar que há um equilíbrio nos valores positivos e negativos (Figura 6), o que indica que o relevo estaria numa posição intermediária entre íngreme e suave. No entanto, percebe-se uma tendência maior nos valores positivos do que negativos para os dados extraídos da imagem GDEM (Figura 6C), o que corrobora com a imagem produzida (Figura 7), ou seja, o terreno tende a ser mais suavizado e impossibilitando a delimitação dos tipos de curvatura horizontal. Então, como os dados das imagens TOPODATA e SRTM estão mais equilibrados na distribuição de valores positivos e negativos (Figura 6A e 6B), permitiram uma melhor análise para esta morfometria.

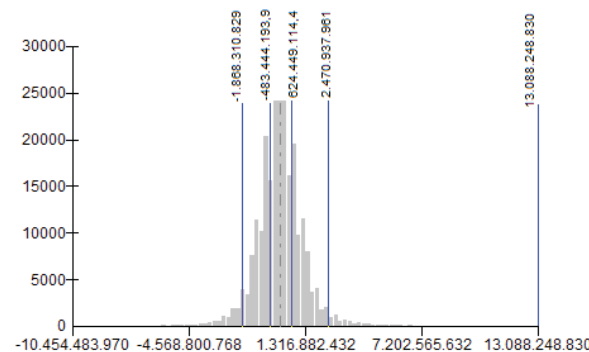
A análise visual da curvatura horizontal feita nos três MDE mostrou que apenas o TOPODATA gerou imagens com dados mais concisos e de boa resolução em todas as três escalas avaliadas (Figura 7), porém as feições de curvatura horizontal ficaram mais evidentes nas escalas de 1:50.000 e 1:25.000 (Figuras 7B e 7C). A imagem do produto SRTM só poderia ser utilizada na escala de 1:100.000, pois com esse nível de detalhamento ainda se consegue identificar os tipos de curvaturas (Figura 7A), nas demais escalas esse MDE não seria mais útil por causa do comprometimento da qualidade da visualização das feições. Para análise da curvatura horizontal a partir do produto GDEM não foi possível fazer a identificação das feições divergentes e convergentes com clareza devido à grande quantidade de informações que a imagem oferece, o que ocasiona um “ruído” no resultado pela complexidade na matemática aplicada na interpolação dos dados, porém se consegue identificar as feições planares com mais clareza do que nos outros modelos avaliados (Figura 7).

### 3.4 Curvatura Vertical

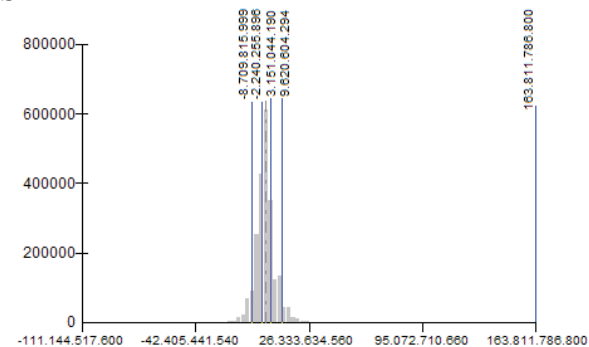
O estudo da curvatura vertical refere-se ao caráter convexo/côncavo do terreno quando analisado em perfil (VALERIANO, 2003a). A análise dos tipos de curvaturas vertical de



TOPODATA



SRTM



GDEM

Fig. 6 - Histogramas representando a estatística das informações de curvatura horizontal para os três MDE avaliados: (A) TOPODATA, (B) SRTM e (C) GDEM. A média está tracejada.

vertentes é interessante do ponto de vista morfológico, pedogenético e hidrológico. O caráter vertical da curvatura associado à declividade, ao clima e ao substrato do terreno pode inferir o tipo de solo formado na vertente, sua possível movimentação por gravidade e até prováveis pontos de acumulação. Sua aplicabilidade também é bem sucedida no mapeamento geomorfológico e pedológico.

As imagens geradas em ambiente SIG através de cálculos automáticos de MDE, bem como de técnicas manuais, apresentam valores negativos, positivos e nulos na representação

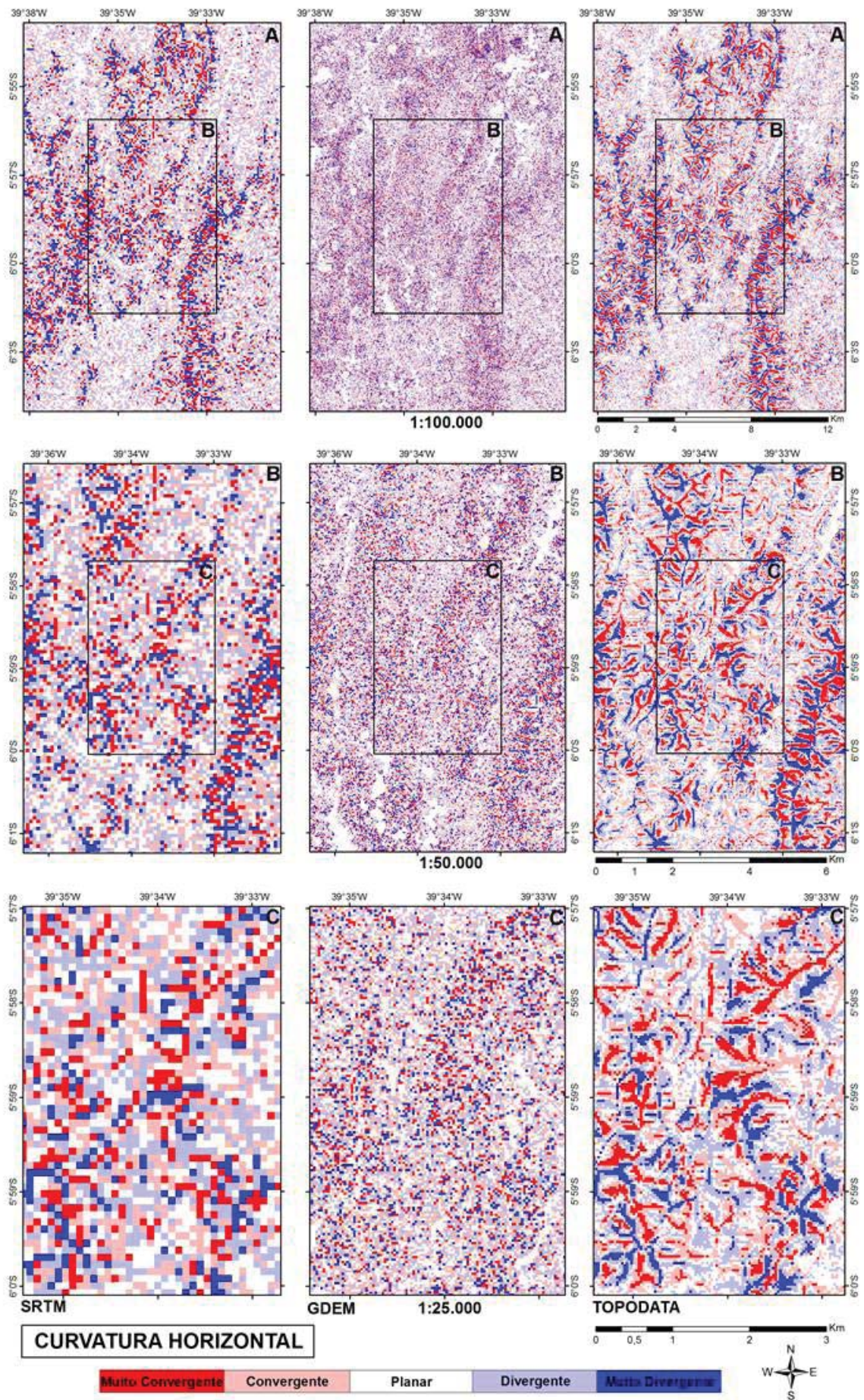


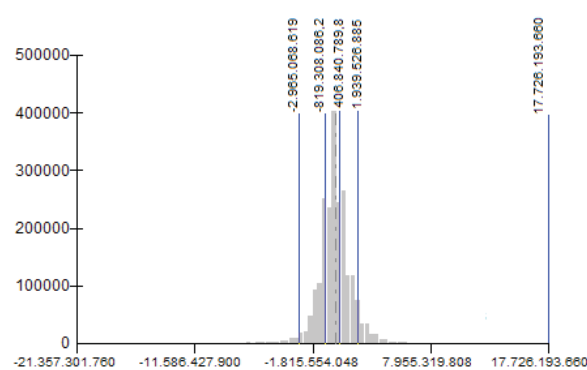
Fig. 7 – Mapa de Curvatura Horizontal nas escalas de (A) 1:100.000, (B) 1:50.000 e (C) 1:25.000, utilizando como base os MDE SRTM, GDEM, TOPODATA.

numérica das formas verticais dos relevos. Teoricamente vertentes retilíneas apresentam valor de curvatura nulo, vertentes côncavas têm valores positivos e vertentes convexas os valores de curvatura são negativos (ANJOS & MENEGUETTE JUNIOR, 2007; VALERIANO, 2003b). No entanto, esses valores podem se inverter, os valores negativos representando curvaturas côncavas e os valores positivos representando as curvaturas convexas (AKGÜN & TÜRK, 2011; JULIAN *et al.*, 2012). No caso das imagens geradas os valores que corresponderam à realidade do mapa foram positivos para curvatura côncavas e negativos para convexas.

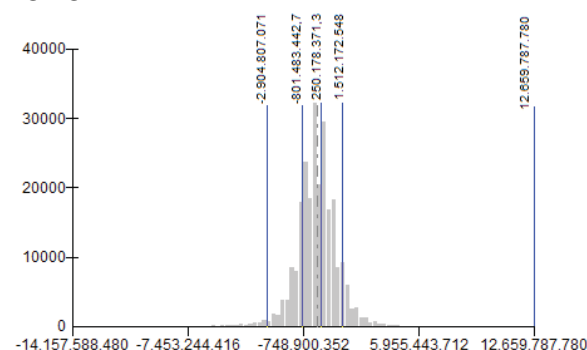
Analisando os dados estatísticos representados pelos histogramas produzidos pelos três MDE estudados determinou que existe uma diferença clara entre os dados do GDEM com os dados dos demais modelos, onde os valores concentram-se mais no lado positivo (Figura 8C), o que gera uma maior quantidade de curvaturas verticais do tipo côncava.

Os histogramas dos modelos TOPODATA e SRTM denotam uma tendência maior para valores negativos (Figura 8A e 8B), o que implica numa maior quantidade de curvaturas verticais do tipo convexa. Pelo conhecimento da área de estudo a tendência é que seja mais representativa a ocorrência de curvaturas convexas pela caracterização geológica, onde os terrenos são compostos por gnaisses e granitos.

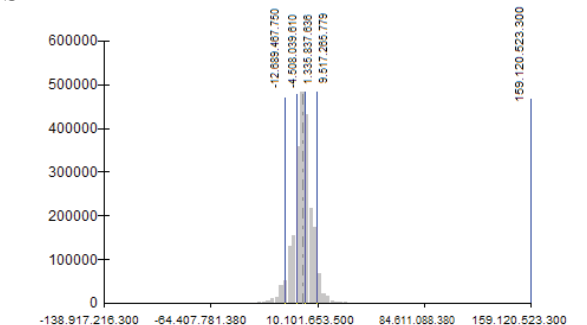
A análise qualitativa dos produtos de curvatura vertical dos três MDE apresentaram resultados diferentes para as feições de curvatura vertical em todas as escalas trabalhadas no mapa (1:100.00, 1:50.000, 1:25.000). No que diz respeito à qualidade das imagens, o TOPODATA foi o que obteve o melhor resultado em todos os níveis de detalhamento (Figura 9). Na avaliação feita para análise da curvatura vertical na escala de 1:100.000 constatou-se que tanto o produto SRTM como o produto TOPODATA geraram imagens de boa qualidade visual. A imagem do SRTM mostrou a existência de mais feições de curvatura muito côncavas e muito convexas na área estudada, porém a imagem do TOPODATA apresentou uma maior quantidade de curvaturas retilíneas. O GDEM originou uma imagem muito desfocada, não permitindo a identificação clara das formas de curvatura vertical (Figura 9A).



TOPODATA



SRTM



GDEM

Fig. 8 - Histogramas representando a estatística das informações de curvatura vertical para os três MDE avaliados: (A) TOPODATA, (B) SRTM e (C) GDEM. A média está tracejada.

A análise realizada na escala de 1:50.000 apontou que a qualidade da imagem SRTM ficou comprometida pela sua resolução espacial. O produto de curvatura vertical produzido pelo MDE da imagem GDEM mostraram as feições mais suavizadas, sem deixar claras as delimitações dos tipos de curvaturas verticais avaliadas. Este efeito foi causado pela grande quantidade de informações contida na imagem (Figura 8C). E o MDE do TOPODATA gerou uma imagem com excelente resolução, proporcionando uma melhor identificação dos tipos de curvaturas em perfil (Figura 5B). Para a escala 1:25.000, constatou-se que o dado TOPODATA está

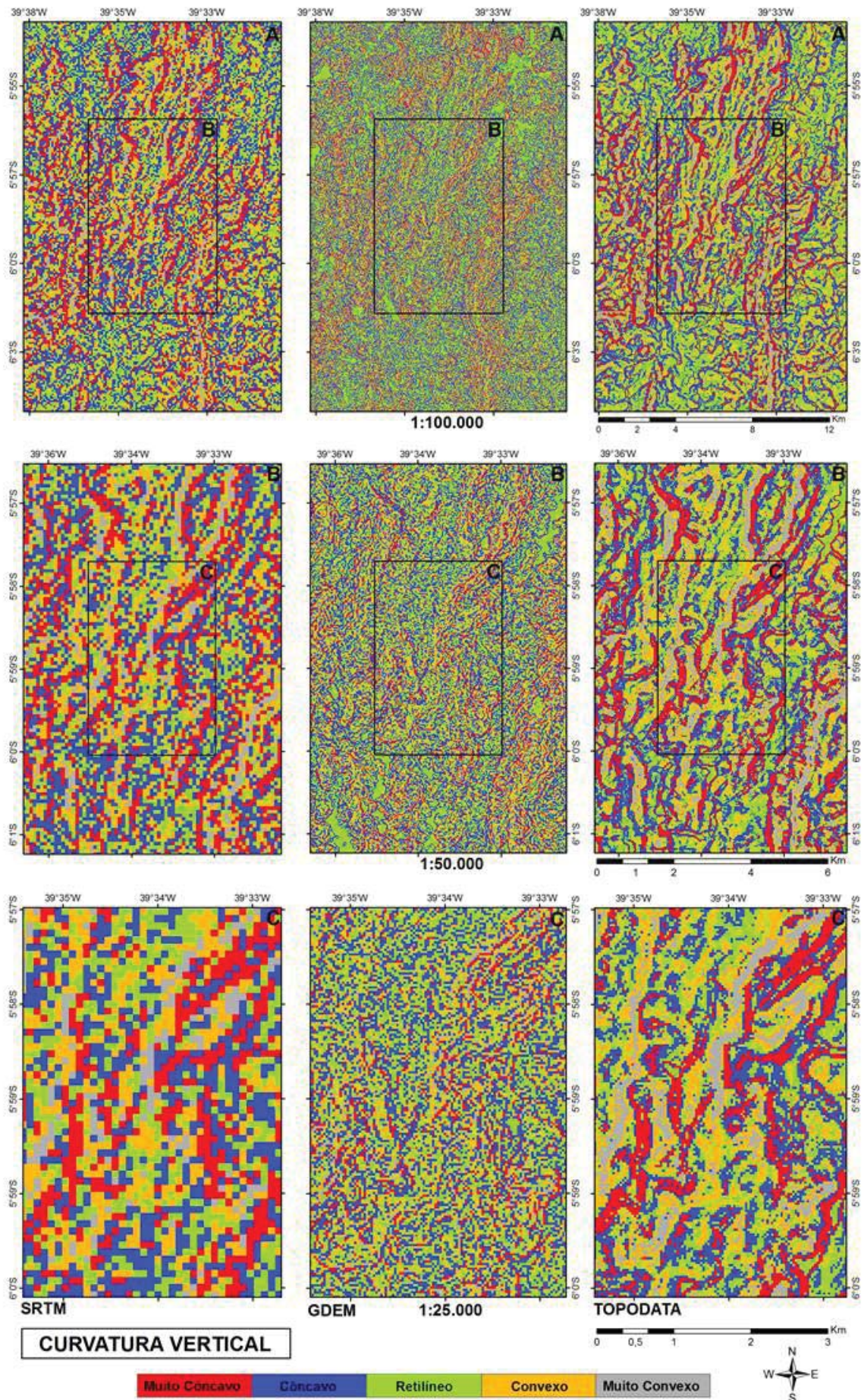


Fig. 9 – Mapa de Curvatura Vertical nas escalas de (A) 1:100.000, (B) 1:50.000 e (C) 1:25.000, utilizando como base os MDE SRTM, GDEM, TOPODATA.

no limite da sua resolução, mas que mesmo assim continua o melhor entre os três modelos avaliados para este tipo de análise, onde tanto o produto SRTM como o produto GDEM não apresentaram com clareza as informações de curvatura vertical (Figura 9C).

O MDE TOPODATA obteve o melhor desempenho em todas as variáveis morfométricas geradas e em todas as escalas testadas, que de acordo Fernández *et al* (2012), o TOPODATA apesar de suas limitações é compatível para execução de trabalhos com a escala de 1:100.000 e menores. Nesse sentido Miceli *et al.* (2011) calculou o PEC dos MDE SRTM, ASTER-GDEM e TOPODATA para uma região de relevo acidentado, semelhante à área teste, e pôde confirmar que o TOPODATA obteve os melhores resultados em relação ao cálculo do PEC, atingindo as classes de padrão A e B, para as escalas de 1:100.000 e 1:50.000, respectivamente.

Segundo Medeiros *et al.* (2009), o MDE SRTM, que obteve PEC classe A para escala de 1:100.000, esse fato pode explicar o relativo bom desempenho desse MDE para geração das variáveis morfométricas e apresentadas nessa mesma escala, principalmente para variável de declividade, que apresentou uma boa precisão cartográfica nas áreas de declividades baixas até em locais de declividades mais acentuada. De fato nesse trabalho o MDE SRTM, obteve razoável desempenho para dos produtos declividade e orientação de vertentes. Nesse sentido Fornelos e Neves (2007), corroboram que o SRTM, pode gerar cartas de declividades e orientação de vertentes, compatíveis com a escala de até 1:100.000.

Além disso, Miceli *et al.* (2011) conseguiu determinar pelo estudo que fizeram que em relevos fortemente ondulados a montanhosos os MDE do TOPODATA apresentaram os melhores resultados de análise morfométrica, corroborando com os resultados obtidos aqui neste trabalho. Mas eles afirmam também que para relevos suave ondulado a ondulado os produtos do ASTER-GDEM tiveram melhor desempenho, o que é de certa forma correta quando visto na escala de 1:25.000 um maior detalhamento do relevo nos mapas de declividade e de curvatura vertical.

#### 4. CONCLUSÃO

O intuito deste trabalho foi a realização de análises comparativas/qualitativas dos produtos de variáveis morfométricas (declividades, orientação de vertentes, curvaturas horizontal e vertical) gerados a partir dos MDE do SRTM, do GDEM e do TOPODATA, utilizando três escalas de observação (1:100.000, 1:50.000 e 1:25.000). Estas análises permitiram avaliar quais modelos e quais escalas foram mais adequadas para representar tais variáveis para a área em estudo.

Pôde-se concluir que apesar de que cada MDE tem sua aplicação na geração das variáveis morfométricas, o modelo que obteve o melhor desempenho de uma forma geral foi o do TOPODATA, em todas as escalas avaliadas. O MDE do SRTM também surpreendeu nos resultados analisados, onde apresentou bons resultados na escala de 1:100.000, muitas vezes similares aos do TOPODATA, porém em outras escalas a qualidade dos resultados obtidos foi comprometida pela limitação da sua resolução espacial, o que também é corroborado pela análise feita nos dados estatísticos.

As imagens das variáveis morfométricas feitas para o produto GDEM, apesar de toda sua riqueza de dados, não apresentou bons resultados, principalmente na escala de 1:100.000, pois em muitas dela a qualidade dos resultados era comprometida pela grande variedade de informação, denotando muitas vezes um resultado difuso, sem clareza na informação analisada, que pelos dados estatísticos mostraram uma tendência na suavização da morfologia do terreno, o que complica qualquer tipo de análise morfométrica. Vê-se que os resultados estão dependentes diretamente da resolução espacial das imagens e que imagens interferométricas são melhores para geração de MDE do que imagens ópticas, neste caso por causa do processo ser simplesmente por paralaxe e não por interseção de circunferências contendo o ponto P no espaço.

As variáveis morfométricas são de grande importância na análise local e até regional das formas de relevo e da dinâmica dos elementos que neles se instalam (formação de solo, vegetação e orientação da dinâmica de fluxos). Essas variáveis morfométricas associadas ao conhecimento da geologia, dos solos, do clima

e da cobertura vegetal local, permite que seja feita uma previsão mais coerente da evolução dos relevos com topografias mais acentuadas (regiões serranas), permitindo dessa forma a possibilidade de mensurar a localização de possíveis pontos mais suscetíveis a deslizamentos de encostas, bem como prováveis áreas de maior erosão e acumulação de sedimentos. Os MDE, disponíveis gratuitamente, podem fornecer essas condições de análise em escalas de médio detalhe. Estudos de maior detalhamento, em escalas locais, em nível de vertente, necessitam de modelos com maior acurácia e resolução.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa, ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará pelo apoio a realização da pesquisa e ao Laboratório de Geoprocessamento do CE (GEOCE) pela disponibilidade do espaço, material e equipamentos para pesquisa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKGÜN, A.; TÜRK, N. Mapping erosion susceptibility by a multivariate statistical method: A case study from the Ayvalik region, NW Turkey. **Computers & Geosciences**, v. 37, p. 1515-1524, 2011.
- ANJOS, D. S.; MENEGUETTE JUNIOR, M. Análise da Curvatura de Vertentes via Thin Plate Spline e Inferência Fuzzy. In: II SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOMÁTICA E V COLÓQUIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS, 2007, Presidente Prudente. **Anais do II Simpósio Brasileiro de Geomática e V Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas**, Presidente Prudente, 2007.
- ARNOLD, N. A new approach for dealing with depressions in digital elevation models when calculating flow accumulation values. **Progress in Physical Geography**, v. 34, n. 6, p. 781-809, 2010.
- DIAS, F. M.; MICELI, B. S.; 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. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO – SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 2011. **Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE p.411, 2011.
- DRÄGUT, L.; EISANK, C. Object representations at multiple scales from digital elevation models. **Geomorphology**, v. 129, p. 183-189, 2011.
- DUMAS, P.; INTEMPS, J. P. R.; MANGEAS, M.; LUNEAU, G. Developing erosion models for integrated coastal zone management: A case study of The New Caledonia west coast. **Marine Pollution Bulletin**, v. 61, p. 519-529, 2010.
- EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2. ed. – Rio de Janeiro: EMBRAPA-SPI, 2006. P. 306.
- ERSDAC, LP DAAC. Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER): Global digital elevation model (GDEM) Version. **ASTER GDEM 2 Readme**, 2011.
- FARR, T. G.; ROSEN, P. A.; CARO, E.; CRIPPEN, R.; DUREN, R.; HENSLEY, S.; KOBRICK, M.; PALLER, M.; RODRIGUEZ, E.; ROTH, L.; SEAL, D.; SHAFFER, S.; SHIMADA, J.; UMLAND, J.; WERNER, M.; OSKIN, M.; BURBANK, D.; ALSDORF, D. The Shuttle Radar Topography Mission. **Reviews of Geophysics**, v. 45, RG2004, 2007.
- FERNÁNDEZ, D. C. J.; VALERIANO, M. M.; ZANI, H.; ANDRADES FILHO, C. O. Extração automática de redes de drenagem a partir de modelos digitais de elevação. **Revista Brasileira de Cartografia**, Nº 64/05, p. 619-634, 2012.
- FENG, W-W.; BAJCSY, P. Extracting Topographic Features From Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Images. **Technical Report**, 2005.
- FONI, A.; SEAL, D. Shuttle Radar Topography Mission: an innovative approach to shuttle orbital control. **Acta Astronautica**, v. 54 p. 565-570, 2004.
- FORNELOS, L. F.; NEVES, S. M. A. S. Uso de modelos digitais de elevação (MDE) gerados a partir de imagens de radar interferométrico (SRTM) na estimativa de perdas de solo. **Revista**



**Brasileira de Cartografia**, Nº 59/01, 2007.

GREVE, M. H.; KHEIRA, R. B.; GREVE, M. B.; BØCHER, P. K. Quantifying the ability of environmental parameters to predict soil texture fractions using regression-tree model with GIS and LIDAR data: The case study of Denmark. **Ecological Indicators**, v. 18, p.1-10, 2012.

HE, S.; PAN, P.; DAI, L.; WANG, H.; LIU, J. Application of kernel-based Fisher discriminant analysis to map landslide susceptibility in the Qinggan River delta, Three Gorges, China. **Geomorphology**, v. 171-172, p. 30-41, 2012.

HILBERTS, A.G.J.; LOONA, E.E.V.; TROCHA, P.A.; PANICONI, C. The hillslope-storage Boussinesq model for non-constant bedrock slope. **Journal of Hydrology**, v. 291, p. 160-173, 2004.

JAKOB, J.; VAN, Z. The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM): A breakthrough in remote sensing of topography. **Acta Astronautica**, Great Britain, v. 48, n. 5-12, p. 559-565, 2001.

JULIAN, J. P.; ELMORE, A. J.; GUINN, S. M. Channel head locations in forested watersheds across the mid-Atlantic United States: A physiographic analysis. **Geomorphology**, v. 177-178, p.194–203, 2012.

KAWABATA, D.; BANDIBAS, J. Landslide susceptibility mapping using geological data, a DEM from ASTER images and an Artificial Neural Network (ANN). **Geomorphology**, v. 113, p. 97-109, 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**, Nº 61/02, 2009.

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**, Nº 63/01, 2011.

MOORE, I. D.; GRAYSON, R. B.; LADSON, A.R. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological

applications. **Hydrological Processes**, v. 5, p. 3-30, 1991.

MOURA, L. Z.; BIAS, E. S.; BRITES, R. Avaliação da acurácia vertical de modelos digitais de elevação (MDEs) nas bacias do Paranoá e São Bartolomeu. **Revista Brasileira de Cartografia**, Nº 66/01, p. 1-14, 2014.

OKSANEN, J.; SARJAKOSKI, T. Error propagation of DEM-based surface derivatives. **Computers & Geosciences**, v. 31, p.1015-1027, 2005.

OLIVEIRA, M. C. Construção de uma carta para determinação de orientação de vertentes. **Revista do Instituto Geológico**, v. 5, n.1/2, p. 47-50, 1984.

OZDEMIR, A. GIS-based groundwater spring potential mapping in the Sultan Mountains (Konya, Turkey) using frequency ratio, weights of evidence and logistic regression methods and their comparison. **Journal of Hydrology**, v. 411, p. 290-308, 2011.

PIERCE, L.; KELLNDORFER, J.; WALKER, W.; BARROS, O. Evaluation of the Horizontal Resolution of SRTM Elevation Data. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 72, n. 11, p. 1235-1244, 2006.

PRADHAN, B. Remote sensing and GIS-based landslide hazard analysis and cross-validation using multivariate logistic regression model on three test areas in Malaysia. **Advances in Space Research**, v. 45, p. 1244-1256, 2010.

QIN, C-Z.; ZHU, A-X.; SHI, X.; c, LI, B-L.; PEI, T.; ZHOU, C-H. Quantification of spatial gradation of slope positions. **Geomorphology**, v. 110, p.152-161, 2009.

RAAFLAUB, L. D.; COLLINS, M. J. The effect of error in gridded digital elevation models on the estimation of topographic parameters. **Environmental Modelling & Software**, v. 21, p.710-732, 2006.

RABUS, B.; EINEDER, M.; ROTH, A.; BAMLER, R. The shuttle radar topography mission – a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 57 p. 241-262, 2003.

- SUN, G.; RANSON, K. J.; KHARUK, V.I.; KOVACS, K. Validation of surface height from shuttle radar topography mission using shuttle laser altimeter. **Remote Sensing of Environment**, v. 88, p. 401-411, 2003.
- TACHIKAWA T.; KAKU, M.; IWASAKI, A.; GESCH, D.; OIMOEN, M.; ZHANG, Z.; DANIELSON, J.; KRIEGER, T.; CURTIS, B.; HAASE, J.; ABRAMS, M.; CRIPPEN, R.; CARABAJAL, C. ASTER Global Digital Elevation Model Version 2 – Summary of Validation Results. In: MEYER, D. (Org.). **ASTER GDEM Validation Team**, NASA, p. 26, 2011.
- VALERIANO, M. M. Curvatura vertical de modelos digitais de elevação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO-SBSR, Belo Horizonte, Brasil, 11, 2003. **Anais XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Belo Horizonte: 2003, INPE, p. 409-411, 2003a.
- VALERIANO, M. M. Curvatura vertical de vertentes em microbacias pela análise de modelos digitais de elevação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 3, p. 539-546, 2003b.
- VALERIANO, M. M. **Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul**. São José dos Campos, SP: INPE: Coordenação de Ensino, Documentação e Programas Especiais (INPE-10550-RPQ/756). 72 p., 2004.
- VALERIANO, M. M. **Topodata: guia para utilização de dados geomorfológicos locais**. São José dos Campos, SP: INPE: Coordenação de Ensino, Documentação e Programas Especiais (INPE-15318-RPE/818). 72 p., 2008.
- VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F. Topodata: Brazilian full coverage refinement of SRTM data. **Applied Geography**, v. 32, p. 300-309, 2012.
- WILSON, J. P. Digital terrain modeling. **Geomorphology**, v. 137, p. 107-121, 2012.
- WILSON, J.P.; GALLANT, J.C. **Terrain Analysis: principles and applications**. New York: Wiley, 2000. 479 p.