

## AVALIAÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO PARA ANÁLISE ESPACIAL DE BACIAS HIDROGRÁFICAS

<sup>1</sup>Sidney Sara Zanetti

<sup>2</sup>Marcelo Dan Scárdua

<sup>3</sup>Roberto Avelino Cecílio

<sup>4</sup>Alexandre Rosa dos Santos

<sup>5</sup>Marco Aurélio Costa Caiado

1 Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Agrárias e Engenharias Depto. de Ciências Florestais e da Madeira. [sszanetti@yahoo.com.br](mailto:sszanetti@yahoo.com.br)

2 Engº Agrícola e Ambiental, M. Sc., [mdanscardua@yahoo.com.br](mailto:mdanscardua@yahoo.com.br)

3 Engº Agrícola, D. Sc., Professor da UFES, [roberto.cecilio@ufes.br](mailto:roberto.cecilio@ufes.br)

4 Engº Agrônomo, D. Sc., Professor da UFES, [mundogeomatica@yahoo.com.br](mailto:mundogeomatica@yahoo.com.br)

5 Engº Agrônomo, Ph. D., Professor do Instituto Federal do Espírito Santo (IFES), [mcaiado@ifes.edu.br](mailto:mcaiado@ifes.edu.br)

**RESUMO.** Objetivou-se com o presente trabalho avaliar Modelos Digitais de Elevação (MDE's) para análise espacial de bacias hidrográficas. Foram utilizados três tipos de MDE's: a) MDE<sub>I</sub>: obtido por interpolação de dados cartográficos do IBGE; b) MDE<sub>A</sub>: ASTER GDEM; e c) MDE<sub>T</sub>: TOPODATA. Foram utilizados os MDE's originais e refinados usando o algoritmo AGREE (MDE<sub>Ir</sub>, MDE<sub>Ar</sub> e MDE<sub>Tr</sub>). Foram comparadas as hidrografias numéricas (HN's) e as delimitações automáticas das bacias. Sobre as HN's sem refinamento, a gerada com o MDE<sub>T</sub> apresentou melhor desempenho que o MDE<sub>A</sub>. Os MDEs refinados proveram delimitações mais acuradas que os não refinados. Nas delimitações sem refinamento, a derivada do MDE<sub>I</sub> foi a que mais se aproximou da delimitação de referência, seguida pelo MDE<sub>T</sub> e MDE<sub>A</sub>. Sobre as delimitações obtidas com os MDE's refinados, a de melhor qualidade foi obtida com o MDE<sub>Ir</sub>, seguida do MDE<sub>Ar</sub> e MDE<sub>Tr</sub>, sendo os resultados relativamente próximos.

**Palavras-chave:** hidrografia; sistemas de informação geográfica; delimitação de bacias.

**ABSTRACT.** The objective of this work was to evaluate Digital Elevation Models (MDE's) for spatial analysis of river basins. Three types of MDE's were used: a) MDE<sub>I</sub>: obtained by interpolation of IBGE cartographic data; (b) MDE<sub>A</sub>: ASTER GDEM; and c) MDE<sub>T</sub>: TOPODATA. The original and refined MDEs were used using the AGREE algorithm (MDE<sub>Ir</sub>, MDE<sub>Ar</sub>, and MDE<sub>Tr</sub>). Numerical hydrographs (HN's) and automatic basins delimitations were compared. On HN's without refinement, the one generated with the MDE<sub>T</sub> presented better performance than the MDE<sub>A</sub>. Refined MDE's provided more accurate delineations than non-refined ones. In the delimitations without refinement, the derivative of the MDE<sub>I</sub> was the one that most approached the reference delimitation, followed by the MDE<sub>T</sub> and MDE<sub>A</sub>. On the delimitations obtained with the refined MDE's, the best quality was obtained with MDE<sub>Ir</sub>, followed by MDE<sub>Ar</sub> and MDE<sub>Tr</sub>, and the results are relatively close.

**Keywords:** hydrography; geographic information systems; river basin delimitations.

## INTRODUÇÃO

O conhecimento hidrológico é fundamental para o planejamento e gestão dos recursos hídricos, pois é a partir da disponibilidade de dados confiáveis que se conhece, estuda, avalia, executa e gerencia as relações da água com os demais recursos e a sustentabilidade dos meios e processos envolvidos. Para isso, as bacias hidrográficas (BH's) foram adotadas como unidade de planejamento e gestão territorial, devido aos fenômenos e interações atuarem de forma integrada (NASCIMENTO; VILLAÇA, 2008).

O crescente avanço tecnológico na área computacional e espacial tem possibilitado a obtenção de informações hidrológicas de forma rápida, menos subjetiva e com menor custo. Nesse contexto, os sistemas de informações geográficas (SIG's) são importantes ferramentas para o processamento e gerenciamento destes dados (BOSQUILIA et al., 2015; RIBEIRO; FERREIRA, 2014).

Os modelos digitais de elevação (MDE's) são a principal fonte de dados para a representação matemática das feições do terreno (RIBEIRO; FERREIRA, 2014; WILSON, 2012). Um MDE pode ser obtido a partir de processos fotogramétricos, de cartas topográficas ou de sensores

remotos diversos (MICELI et al., 2011). Existem várias fontes de MDE's disponíveis gratuitamente na internet, como, por exemplo, o SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), o GDEM (*Global Digital Elevation Model*) e o TOPODATA. No entanto, estes dados podem não ser adequados para uma análise hidrológica de forma direta (RIBEIRO; FERREIRA, 2014).

Wechsler (2007) apresentou uma série de incertezas que afetam a utilização de MDE's em aplicações hidrológicas. De acordo com Li et al. (2011), poucos estudos têm abordado formas de processamento dos MDE's visando minimizar os erros.

As etapas de processamento do MDE, juntamente com a origem dos dados ou do MDE bruto, se não forem bem avaliadas, podem comprometer a qualidade das informações obtidas (PIRES et al., 2005). Além disso, percebe-se que não existe um consenso na literatura sobre qual MDE possui melhor desempenho em aplicações hidrológicas. Diante do exposto, o objetivo do presente trabalho foi avaliar MDE's de diferentes origens (cartas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), ASTER e TOPODATA), originais e modificados, aplicados em análises espaciais de BH's.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

O presente estudo foi realizado na bacia hidrográfica do ribeirão Vala do Souza (SBVS), com área de 181,28 km<sup>2</sup>, localizada em sua maior parte no município de Jerônimo Monteiro, estado do Espírito Santo, compreendida entre os paralelos 20°45' e 20°55' de latitude Sul e os meridianos 41°20' e 41°28' de longitude Oeste (Figura 1). A referida bacia está contida na BH do rio Itapemirim.

Foram utilizados MDE's oriundos de três tipos de fontes de dados, ambos com resolução espacial de 30 metros: a) MDE<sub>I</sub>: proveniente da interpolação de dados cartográficos do IBGE; b) MDE<sub>A</sub>: proveniente do ASTER GDEM (*Global Digital Elevation Model*, Versão 2); e c) MDE<sub>T</sub>: proveniente do projeto TOPODATA, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Os MDE<sub>A</sub> e MDE<sub>T</sub> foram adquiridos diretamente nos websites da NASA (<http://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>) e INPE (<http://www.dsr.inpe.br/topodata>), respectivamente. Ressalta-se que os MDE's utilizados são diferentes quanto à sua forma de aquisição, sendo o MDE<sub>I</sub> oriundo de restituição fotogramétrica a partir de fotografias aéreas

(IBGE), o MDEA obtido em nível orbital a partir de sensores passivos (ASTER) e o MDET obtido em nível orbital a partir de sensores ativos (TOPODATA).

O MDE<sub>I</sub> foi elaborado a partir de dados cartográficos digitalizados do IBGE, na escala de 1:50.000, contendo curvas de nível com equidistância vertical de 20 m, hidrografia e pontos cotados existentes nas áreas mais altas (topos) e mais baixas do relevo. Para interpolação foi utilizado o algoritmo *Topo To Raster*, devido à sua eficiência já reconhecida, constatada em diversos estudos (CHAVES, 2002; PIRES et al., 2005; SAITO, 2011).

Os três MDE's foram utilizados em suas formas originais e, também, utilizados após um processo de refinamento executado pelo algoritmo AGREE, visando a obtenção de modelos com maior consistência hidrológica, denominados de MDE<sub>Ir</sub>, MDE<sub>Ar</sub> e MDE<sub>Tr</sub>.

O algoritmo AGREE (HELLWEGGER, 1997) possui o objetivo de ajustar o MDE para fazê-lo corresponder aos vetores de fluxo de uma determinada rede de drenagem de referência. O processo consiste em marcar a rede de drenagem conhecida sobre o MDE (*stream burn*), forçando seu gradiente de escoamento a seguir o caminho existente na referida hidrografia (FAN et al., 2011). O MDE resultante, apesar de ser alterado, tem propriedades que podem torná-lo mais útil que o MDE original, dependendo do objetivo de sua utilização, como por exemplo, para a delimitação de BH's.

Utilizou-se, neste trabalho, nas configurações do algoritmo AGREE, para largura, altura e profundidade do talude, os valores de 4 células, 10 metros e 1.000 metros, respectivamente. Utilizou-se, também, a rede de drenagem do IBGE como sendo a hidrografia de referência (HR).

A partir das seis opções de MDE, foram realizadas delimitações automáticas da SBVS, as quais foram comparadas com uma delimitação de referência (DR).

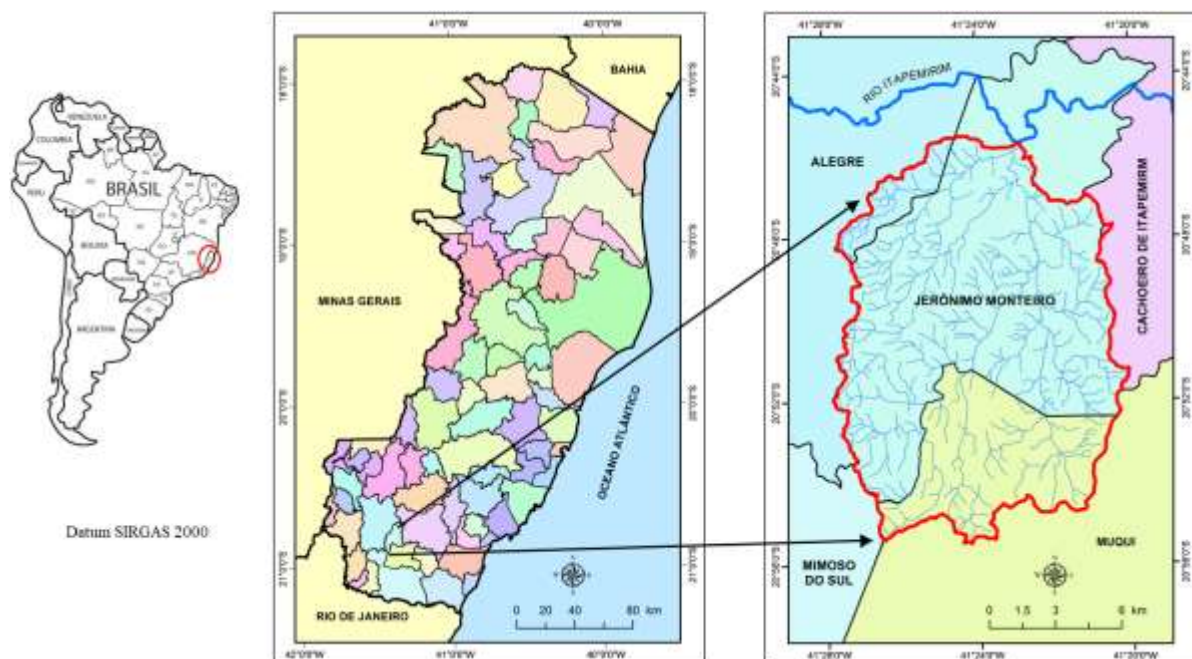
A delimitação considerada como referência foi realizada manualmente (BAKER et al., 2006; MEDEIROS et al., 2009) no ambiente SIG (ArcGIS®), seguindo uma adaptação dos procedimentos descritos em Cecílio et al. (2011) e von Sperling (2007), utilizando os dados cartográficos digitais do IBGE.

As delimitações automáticas foram realizadas utilizando o *Arc Hydro Tools* (AHT) disponível em: <http://blogs.esri.com/esri/arcgis/tag/arc-hydro-10-1/>. Esse pacote de ferramentas também funciona vinculado ao ArcGIS®. As ferramentas do AHT foram usadas para derivar vários

conjuntos de dados que, coletivamente, descrevem os padrões de drenagem da SBVS: dados sobre direção do escoamento; acumulação de escoamento; definição do escoamento; segmentação do escoamento e delimitação das BH's. Estes dados foram utilizados para desenvolver uma representação vetorial das linhas de drenagem da SBVS. Usando esta informação, uma rede geométrica foi construída e, posteriormente, foram delimitadas áreas de tamanhos variados, incluindo a SBVS e suas microbacias.

Para a geração da hidrografia numérica (HN) de cada MDE, também foi utilizado o AHT, com a definição de quais células receberiam o atributo de curso d'água, a partir de um limite de acumulação. Nesse estudo, foi utilizado o valor de 143 células (0,1287 km<sup>2</sup>) como limite de acumulação de escoamento para determinação das células da rede de drenagem. Esse valor foi determinado analisando-se diversas tentativas com valores diferentes, tendo-se adotado o valor com maior semelhança entre a HN gerada e a HR.

A avaliação das delimitações foi realizada de forma qualitativa, por meio de análise visual, e de forma quantitativa, por meio de um procedimento alternativo elaborado, denominado de método das áreas divergentes.



**Figura 1.** Localização da bacia hidrográfica do ribeirão Vala do Souza no estado do Espírito Santo.

Na avaliação qualitativa, a partir da elaboração de mapas temáticos com as delimitações das bacias em questão, estes foram sobrepostos ao mapa da DR, em ambiente SIG. As operações foram realizadas tanto para a delimitação da SBVS, como para as suas microbacias. Com o mesmo critério, foram realizadas, também, sobreposição do mapa da HR com os mapas das HN's geradas a partir dos seis MDE's.

Foram identificadas as alterações mais relevantes no traçado das HN's, em relação à HR, e não necessariamente a sobreposição exata das hidrografias analisadas. Considerou-se como relevante a alteração onde ocorreu o deslocamento de um curso d'água para outro curso d'água vizinho (transposição de bacia), desviando a direção do escoamento em relação à hidrografia usada como referência. Estes indicadores podem não ser conclusivos; porém, se analisados de forma conjunta com os resultados das delimitações obtidas, podem melhorar a análise comparativa sobre a qualidade dos MDE's testados.

As avaliações quantitativas foram realizadas utilizando o aplicativo computacional ArcGIS®, a partir do cálculo das áreas divergentes, que representam o acréscimo e decréscimo de área, em relação à área da DR, sendo consideradas as áreas externas e internas, respectivamente.

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Na Figura 2 são apresentadas as sobreposições entre a DR e as delimitações obtidas para cada MDE sem refinamento. Mesmo visualmente, nota-se claramente que a delimitação derivada do MDE<sub>I</sub> foi a que mais se aproximou da DR. Tal resultado provavelmente se deve ao fato desse MDE ter sido elaborado a partir da mesma base de dados (IBGE) e, também, devido à eficiência do algoritmo *Topo To Raster* utilizado na interpolação (PIRES et al., 2005), que utiliza a HR para melhorar o MDE gerado.

Apesar de o MDE<sub>I</sub> ter se destacado nessa análise, em comparação com o MDE<sub>A</sub> e o MDE<sub>T</sub>, a base de dados do IBGE não está disponível para todo o território brasileiro com a mesma qualidade utilizada no presente estudo, ou seja, contendo curvas de nível com equidistância vertical de 20 m. Portanto, como os MDE's ASTER e TOPODATA são mais acessíveis, realizou-se uma comparação entre os dois, visando identificar o melhor. Assim, mesmo visualmente também, pode-se constatar nitidamente que a delimitação obtida com o MDE<sub>T</sub>

proporcionou melhor resultado que o MDE<sub>A</sub>, pois acrescentou menor área total em relação à DR, sobretudo na parte norte da SBVS, próximo de sua foz, onde o relevo possui menor declividade. Tal resultado indica uma melhor qualidade do MDE<sub>T</sub>. Nas partes onde a declividade do terreno é maior, os MDE's apresentaram resultados relativamente semelhantes. Como já é conhecido, a qualidade dos MDE's pode variar em função da complexidade do relevo (declividade) (MEDEIROS et al., 2009; WECHSLER, 2007; WILSON, 2012), sobretudo os MDE's de nível orbital (ASTER e TOPODATA). Neste sentido, como os MDE's apresentaram resultados semelhantes nas partes do terreno com maior declividade, considera-se que os MDE's avaliados possuem qualidade relativamente equivalente neste aspecto, com vantagem do MDE<sub>T</sub> nas áreas com menor declividade do terreno.

Na Figura 2 são apresentadas, também, as sobreposições entre a hidrografia de referência (HR) e as HN's geradas a partir dos três MDE's testados sem refinamento. No caso do MDE<sub>I</sub>, não foram identificados erros relevantes, fato que também pode ser explicado pela eficiência do algoritmo *Topo To Raster*.

Nas HN's geradas com o MDE<sub>A</sub> e MDE<sub>T</sub> sem refinamento, notam-se vários locais onde os cursos d'água tiveram suas direções alteradas, passando a fazer parte de outro curso d'água (transposição), como ilustrado na Figura 2. Este fato alterou os locais dos divisores de água e, conseqüentemente, alterou também os limites das delimitações das microbacias contidas na área de estudo. Em relação aos MDE<sub>A</sub>, foram identificados pelo menos 12 erros relevantes e, no MDE<sub>T</sub>, pelo menos 5 erros. Tais resultados indicam que o MDE<sub>T</sub> possui maior consistência hidrológica que o MDE<sub>A</sub>, em suas formas originais.

Na Figura 3 são apresentadas as delimitações obtidas com os MDE's refinados. Nesse caso, observa-se que as delimitações apresentaram-se mais semelhantes à DR. Tal fato indica que o refinamento realizado nos modelos, usando o algoritmo AGREE, melhorou os resultados.

Na Figura 3 pode-se notar visualmente, também, uma alta semelhança entre a hidrografia de referência e as HN's geradas usando os MDE's refinados. Tal comportamento confirma a eficiência do algoritmo AGREE utilizado para forçar as HN's a coincidirem com a HR do IBGE. Não foram identificados erros relevantes nas HN's geradas utilizando os MDE's refinados, fato que também demonstra a eficiência da metodologia automática de refinamento utilizada.

Entretanto, apenas a análise visual nesse caso não é suficiente para fazer comparações consistentes. Dessa forma, uma análise quantitativa comparativa de todas as delimitações obtidas, em relação à DR, é apresentada na Tabela 1. Nessa tabela, pode-se conferir e confirmar, também, os resultados obtidos como os MDE's sem refinamento.

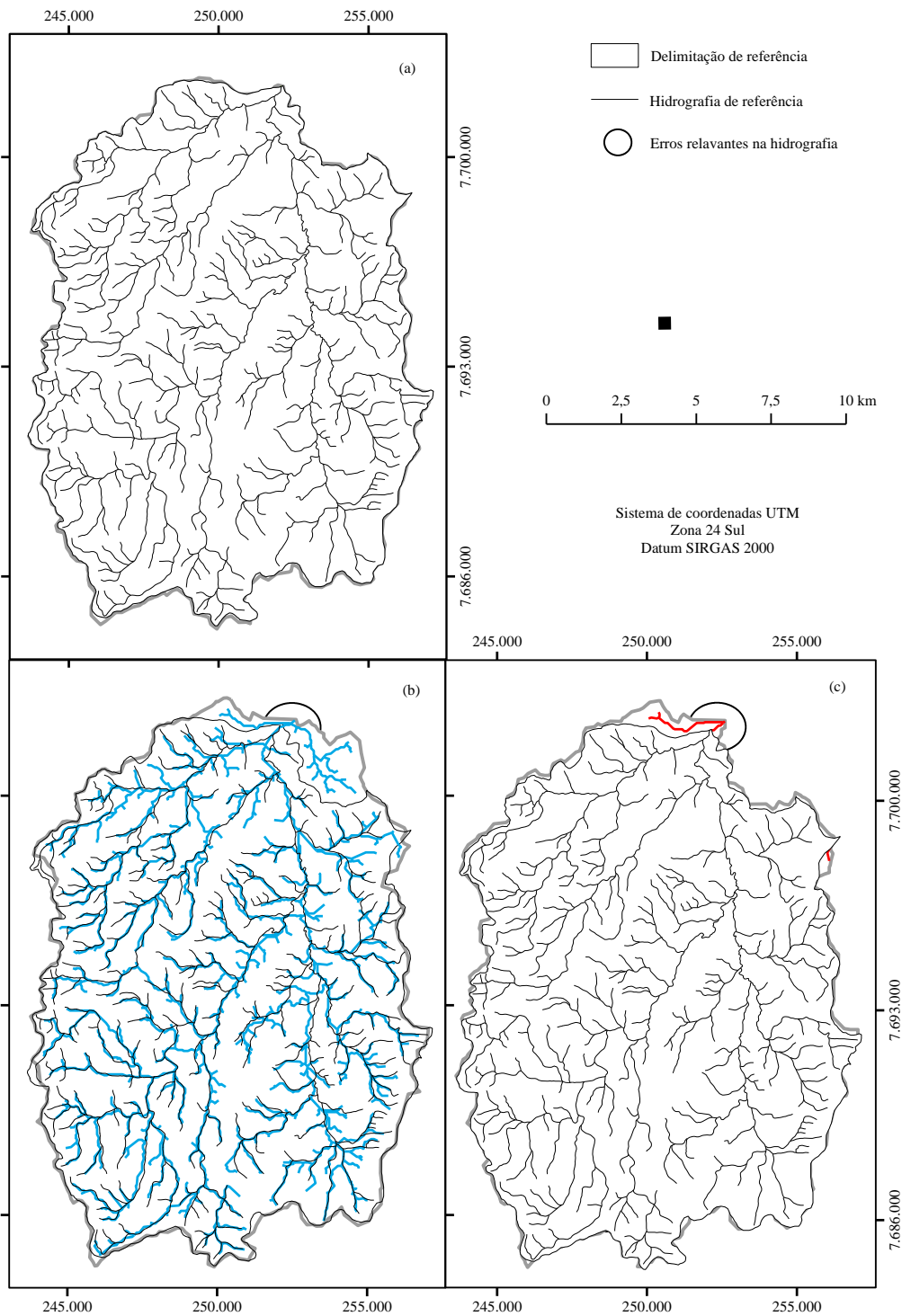
Pode-se verificar, sobretudo a partir dos dados da Tabela 1, que a delimitação que mais se aproximou da referência foi a derivada do MDE<sub>Ir</sub>. Esse resultado provavelmente se deve, também, aos mesmos fatores citados para o respectivo MDE<sub>I</sub>.

Na Tabela 1 observa-se que todas as seis delimitações apresentaram áreas totais maiores que a referência. Já para os perímetros, apenas as duas delimitações obtidas com os MDE's TOPODATA foram superiores. A avaliação dos perímetros pode ser mais útil quando o objetivo é determinar as características fisiográficas de BH's, contudo este não foi o objetivo do presente trabalho.

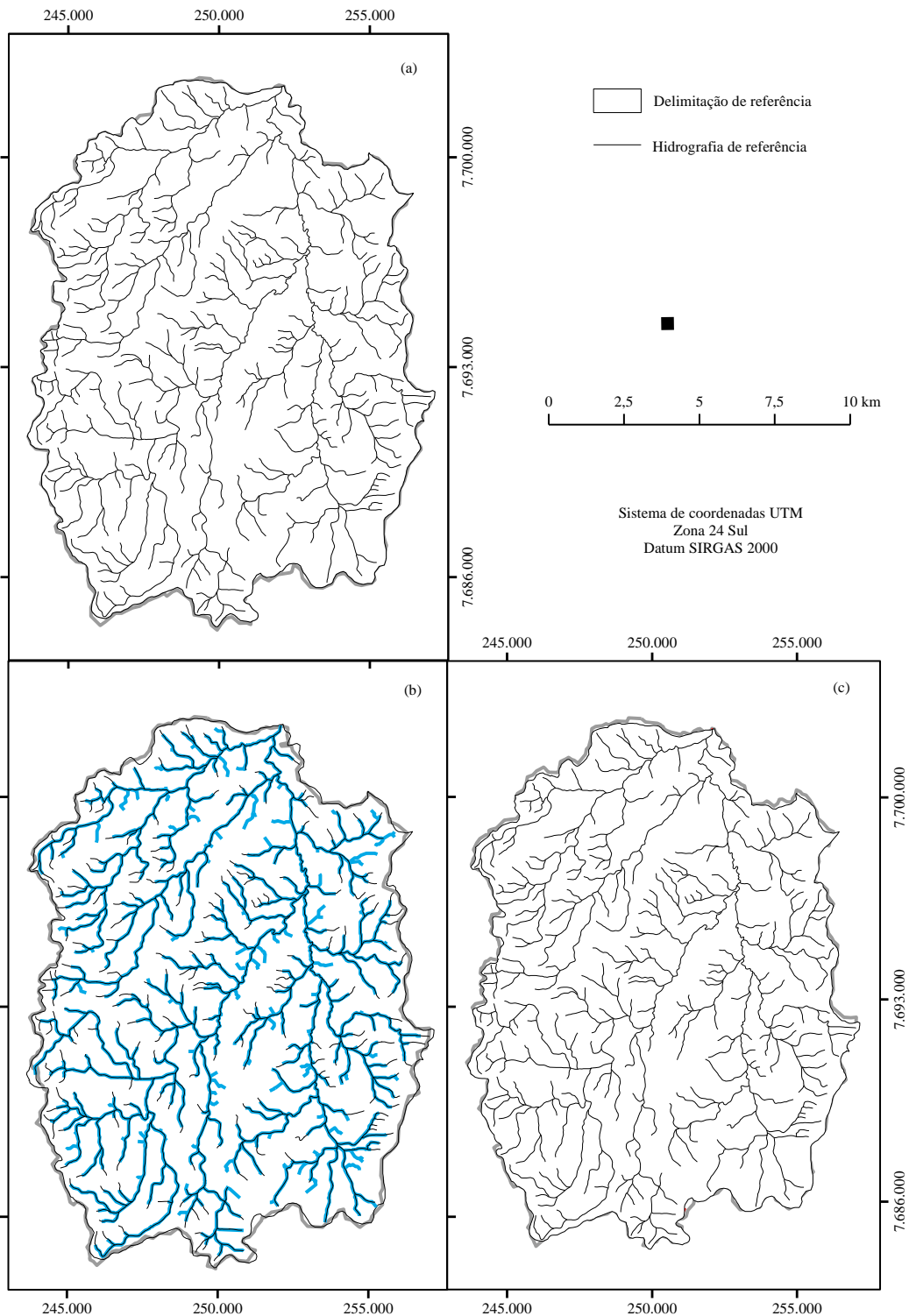
Nesse tipo de análise, a quantificação de áreas totais e perímetros, e suas diferenças em relação à DR, embora sejam relativamente mais eficientes que a avaliação visual, também não são formas eficientes de avaliação comparativa, pois uma mesma área pode estar associada a diferentes valores de perímetro, dando uma equivocada impressão de qualidade da delimitação, mas sem necessariamente significar que os limites dos divisores de águas das bacias foram bem representados. Portanto, para avaliar as delimitações obtidas com os diferentes MDE's de forma mais consistente, foi adotado o procedimento denominado de método das áreas divergentes.

Para um melhor entendimento desse método, ressalta-se que as áreas divergentes foram separadas em áreas externas e internas, para cada delimitação avaliada, em relação à DR. Por exemplo, pode ser observada de forma mais expressiva visualmente, na Figura 2, a ocorrência das maiores áreas externas à DR ao norte da SBVS, originadas das delimitações obtidas com os MDE's ASTER e TOPODATA. Sobre as áreas internas, o entendimento é análogo, podendo ser notadas de forma mais expressiva visualmente, como exemplo, duas áreas internas situadas à oeste da delimitação obtida com o MDE ASTER. Embora seja difícil identificar visualmente todas as áreas internas e externas, todas foram computadas em ambiente SIG, para cada delimitação testada, sendo os resultados também apresentados na Tabela 1.





**Figura 2.** Sobreposições da delimitação e hidrografia de referência com as delimitações e hidrografias obtidas usando os MDE's IBGE (a), ASTER (b) e TOPODATA (c), sem refinamento.



**Figura 3.** Sobreposições da delimitação e hidrografia de referência com as delimitações e hidrografias obtidas usando os MDE's IBGE (a) ASTER (b) e TOPODATA (c), com refinamento.

Dessa forma, a partir dos resultados oriundos da aplicação do método das áreas divergentes (Tabela 1), pode-se confirmar que, dentre as delimitações geradas com os MDE's sem refinamento, a obtida com o MDE<sub>I</sub> apresentou o melhor resultado, sendo que a obtida com o MDE<sub>T</sub> proporcionou melhor resultado que o MDE<sub>A</sub>. Pode-se confirmar, também, que dentre as delimitações geradas com os MDE's refinados, a obtida com o MDE<sub>Tr</sub> também apresentou o melhor resultado, sendo que as diferenças entre os MDE's foram menores, com ligeira vantagem do MDE<sub>Ar</sub> em relação ao MDE<sub>Tr</sub>.

Na Tabela 1 observa-se que todas as seis delimitações apresentaram áreas totais maiores que a referência. Já para os perímetros, apenas as duas delimitações obtidas com os MDE's TOPODATA foram superiores. A avaliação dos perímetros pode ser mais útil quando o objetivo é determinar as características fisiográficas de BH's, contudo este não foi o objetivo do presente trabalho.

**Tabela 1.** Comparação de diferentes delimitações da bacia do ribeirão Vala do Souza, em relação à delimitação de referência (DR), obtidas com diferentes MDE's

Delimitação	Área (km <sup>2</sup> )	Perímetro (km)	Diferença na área (%)	Diferença no perímetro (%)	Área interna (km <sup>2</sup> )	Área externa (km <sup>2</sup> )	Diferença total (%)
DR	181,28	67,08	-	-	-	-	-
MDE <sub>I</sub>	181,99	64,91	0,39	-3,23	0,52	0,91	1,43
MDE <sub>A</sub>	188,62	66,74	4,05	-0,51	0,75	4,80	5,55
MDE <sub>T</sub>	184,68	67,42	1,88	0,51	0,79	2,66	3,45
MDE <sub>Tr</sub>	181,81	66,01	0,29	-1,59	0,54	0,83	1,37
MDE <sub>Ar</sub>	182,18	66,85	0,49	-0,34	0,73	1,22	1,95
MDE <sub>Tr</sub>	182,22	67,27	0,52	0,29	0,88	1,39	2,27

Nesse tipo de análise, a quantificação de áreas totais e perímetros, e suas diferenças em relação à DR, embora sejam relativamente mais eficientes que a avaliação visual, também não são formas eficientes de avaliação comparativa, pois uma mesma área pode estar associada a diferentes valores de perímetro, dando uma equivocada impressão de qualidade da

delimitação, mas sem necessariamente significar que os limites dos divisores de águas das bacias foram bem representados. Portanto, para avaliar as delimitações obtidas com os diferentes MDE's de forma mais consistente, foi adotado o procedimento denominado de método das áreas divergentes.

Para um melhor entendimento desse método, ressalta-se que as áreas divergentes foram separadas em áreas externas e internas, para cada delimitação avaliada, em relação à DR. Por exemplo, pode ser observada de forma mais expressiva visualmente, na Figura 2, a ocorrência das maiores áreas externas à DR ao norte da SBVS, originadas das delimitações obtidas com os MDE's ASTER e TOPODATA. Sobre as áreas internas, o entendimento é análogo, podendo ser notadas de forma mais expressiva visualmente, como exemplo, duas áreas internas situadas à oeste da delimitação obtida com o MDE ASTER. Embora seja difícil identificar visualmente todas as áreas internas e externas, todas foram computadas em ambiente SIG, para cada delimitação testada, sendo os resultados também apresentados na Tabela 1.

Dessa forma, a partir dos resultados oriundos da aplicação do método das áreas divergentes (Tabela 1), pode-se confirmar que, dentre as delimitações geradas com os MDE's sem refinamento, a obtida com o MDE<sub>I</sub> apresentou o melhor resultado, sendo que a obtida com o MDE<sub>T</sub> proporcionou melhor resultado que o MDE<sub>A</sub>. Pode-se confirmar, também, que dentre as delimitações geradas com os MDE's refinados, a obtida com o MDE<sub>Ir</sub> também apresentou o melhor resultado, sendo que as diferenças entre os MDE's foram menores, com ligeira vantagem do MDE<sub>Ar</sub> em relação ao MDE<sub>Tr</sub>.

De forma geral, as delimitações mais semelhantes à DR, em ordem decrescente de qualidade, foram: MDE<sub>Ir</sub>; MDE<sub>I</sub>; MDE<sub>Ar</sub>; MDE<sub>Tr</sub>; MDE<sub>T</sub>; e MDE<sub>A</sub>.

Observa-se que, entre as delimitações advindas do MDE<sub>A</sub> e MDE<sub>T</sub>, quando se analisa a utilização do refinamento com a HR do IBGE na escala de 1:50.000, o MDE<sub>Ar</sub> apresenta resultados mais próximos da referência que o MDE<sub>Tr</sub>; porém, quando analisado sem o refinamento citado, o MDE<sub>T</sub> apresenta maior semelhança na comparação das delimitações.

De acordo com Pires et al. (2005), as comparações da HN, derivada dos MDE's, com a hidrografia mapeada, permitem identificar os modelos que necessitam de procedimentos de pré e pós-processamento para alcançar uma exatidão e consistência hidrológica satisfatória.

Mantelli et al. (2011), utilizando para comparação a rede de drenagem oficial do IBGE, em escala de 1:50.000, também verificaram que os vetores gerados usando o  $MDE_T$  foram mais semelhantes aos vetores da rede oficial de drenagem do que a rede de drenagem gerada usando  $MDE_A$ , com uma resolução espacial de 30 m. Entretanto, Pereira et al. (2012) apontou que o  $MDE_A$ , em relação a uma carta topográfica na escala de 1:80.000, obteve maior similaridade na rede hidrográfica que o  $MDE_T$ , também usando uma resolução espacial de 30 m.

A extração de drenagem baseada no processamento do  $MDE_A$ , comparado ao  $MDE_T$ , parece ser mais suscetível a suavizar as variações topográficas e áreas de baixada e, desta forma, produzir erros, os quais podem gerar muitos vetores de drenagem inexistentes (MANTELLI; et al., 2011).

De acordo com Medeiros et al. (2009), o MDE SRTM apresenta uma excelente relação custo-benefício, pois proporciona economia de tempo e recursos financeiros, além de possibilitar a automatização dos processos de delimitação de bacias e diminuir a subjetividade dos procedimentos.

Marques et al. (2011) constatou que, tendo como referência a drenagem de uma carta topográfica na escala de 1:100.000, o  $MDE_T$  (resolução de 30 m), em relação ao  $MDE_A$  (resolução de 20 m), apresentou maior similaridade com a drenagem da carta topográfica e maior detalhamento dos cursos d'água.

A escala de 1:50.000 é a mais detalhada liberada pelo IBGE para a região em estudo e, também, é indicada no Manual Técnico de Uso da Terra (IBGE, 2006) para fins de mapeamentos de reconhecimento, que abrange o planejamento regional e de BH's. Porém, neste manual, são indicadas escalas mais detalhadas para o estudo de problemas específicos e decisões localizadas, restringindo-se a pequenas áreas.

É importante considerar que ao utilizar MDE's, os erros são inevitáveis, visto que esses modelos são representações simplificadas da realidade, submetidas a um processo de generalização (CHAGAS et al., 2010).

Relativo à delimitação de BH's, os resultados encontrados por Mantelli et al. (2011) mostraram que o uso do  $MDE_T$  fornece dados mais importantes que o  $MDE_A$  para a análise ecológica, além de fornecer informação adicional significativa para a tomada de decisão.

Os MDE's gerados a partir de imagens estereoscópicas de sensores óticos orbitais, como o MDE<sub>A</sub> e MDE<sub>T</sub>, apresentam vantagens como a disponibilidade de dados de todo o planeta, resolução relativamente detalhada, processamento mais rápido através de softwares, pouco esforço manual e baixo custo de processamento. Porém, apresentam também algumas desvantagens, pois contém cotas com erros significativos, o qual se destaca a limitação inerente dos instrumentos de observação a características da superfície do terreno, como rugosidade e declividade (SUBRAMANIAN et al., 2005).

No presente estudo, a situação ideal para a comparação entre as delimitações de BH's seria utilizar como referência o mapeamento real da área em estudo, obtido por levantamento em campo.

## CONCLUSÕES

Considerando as condições utilizadas neste estudo, pode-se concluir que:

- O algoritmo AGREE foi eficiente para refinar os MDE's e proporcionou melhoria na consistência hidrológica da rede de drenagem da bacia estudada.
- A melhor delimitação de bacia foi obtida utilizando o MDE IBGE com refinamento, seguidas em ordem decrescente pelas delimitações geradas com o MDE<sub>I</sub>, MDE<sub>Ar</sub>, MDE<sub>Tr</sub>, MDE<sub>T</sub> e MDE<sub>A</sub>.
- A partir das análises dos MDE's TOPODATA e ASTER originais, a delimitação pelo MDE<sub>T</sub> apresentou melhor desempenho que pelo MDE<sub>A</sub>; porém, nota-se que com os MDE's refinados, a delimitação pelo MDE<sub>Ar</sub> proporcionou melhor representação do que pelo MDE<sub>Tr</sub>.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAKER, M. E.; WELLER, D. E.; JORDAN, T. E. Comparison of Automated Watershed Delineations : Effects on Land Cover Areas , Percentages , and Relationships to Nutrient Discharge. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 72, n. 2, p. 159-168, 2006. DOI: [10.14358/PERS.72.2.159](https://doi.org/10.14358/PERS.72.2.159)

BOSQUILIA, R. W. D.; FIORIO, P. R.; DUARTE, S. N.; MINGOTI, R. Comparação entre

métodos de mapeamento automático de rede de drenagem utilizando SIG. **Irriga**, v. 20, n. 3, p. 445-457, 2015. DOI: [10.15809/irriga.2015v20n3p445](https://doi.org/10.15809/irriga.2015v20n3p445)

CECÍLIO, R. A.; COUTINHO, L. M.; ZANETTI, S. S. Delimitação de bacias hidrográficas. In: ANDRADE, F. V. et al. (Eds.). **Tópicos especiais em produção vegetal II**. Alegre: Centro de Ciências Agrárias, 2011. p. 329-348.

CHAGAS, C. S.; FERNANDES FILHO, E. I.; ROCHA, M. F.; CARVALHO JÚNIOR, W.; SOUZA NETO, N. 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. DOI: [10.1590/S1415-43662010000200014](https://doi.org/10.1590/S1415-43662010000200014)

CHAVES, M. A. 2002. 113 f. **Modelos digitais de elevação hidrologicamente consistentes para a Bacia Amazônica**. Tese (Doutorado em Geociências) – Programa de Pós Graduação em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2002.

FAN, F. M.; COLLISCHONN, W.; BUARQUE, D. C.; PAIVA, R. C. D.; KAYSER, R. **Projeto Integrado de Cooperação Amazônica e de Modernização do Monitoramento Hidrológico: Manual de introdução às ferramentas do Archydro**. Versão 2.1, 74 p. 2011.

HELLWEGER, F. **AGREE - DEM Surface Reconditioning System**. Disponível em:

<http://www.cae.utexas.edu/prof/maidment/GISHYDRO/ferdi/research/agree/agree.html>

LI, S.; MACMILLAN, R.A.; LOBB, D. A.; MCCONKEY, B. G.; MOULIN, A. FRASER, W. R. Lidar DEM error analyses and topographic depression identification in a hummocky landscape in the prairie region of Canada. **Geomorphology**, v. 129, n. 3-4, p. 263-275, 2011. DOI: [10.1016/j.geomorph.2011.02.020](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.02.020)

MANTELLI, L. R.; BARBOSA, J. M.; BITENCOURT, M. D. Assessing ecological risk through automated drainage extraction and watershed delineation. **Ecological Informatics**, v. 6, n. 5, p. 325-331, 2011. DOI: [10.1016/j.ecoinf.2011.04.003](https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2011.04.003)

MARQUES, H. G.; PENATTI, N. C.; FILHO, A. C. P.; FROEHLICH, O.; ALMEIDA, T. I.; R. SHIMABUKURO, Y. Comparação entre modelos de elevação SRTM, TOPODATA E ASTER na delimitação automática de rede de drenagem e limite de bacia hidrográfica. IN: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15., 2011, Curitiba. **Anais...** Curitiba: INPE, 2011. p. 1271-1278.

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**, v. 2, n. 61, p. 137-151, 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**, v. 1, n. 63, p. 191-201, 2011.

NASCIMENTO, W. M.; VILLAÇA, M. G. Bacias hidrográficas: planejamento e gerenciamento. **Revista Eletrônica da Associação dos Geógrafos Brasileiros**, v. 1, n. 7, p. 102-121, 2008.

PEREIRA, L. E.; OLIVEIRA, J. R. S.; ENCINA, C. C. C.; MIRANDA, V. R.; FILHO, A. C. P. Uso de software livre e proprietário na extração automática de rede de drenagem a partir de diferentes MDE. In: SIMPÓSIO DE GEOTECNOLOGIAS NO PANTANAL, 4., 2012, Bonito. **Anais...** Bonito: INPE, 2012. p. 1173-1180.

RIBEIRO, C. A. A. S.; PIRES, J. M.; NASCIMENTO, M. C.; SANTANA, R. M. Análise da exatidão de diferentes métodos de interpolação para geração de modelos digitais de elevação e obtenção de características morfométricas em bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 2, p. 39-47, 2005. DOI: [10.21168/rbrh.v10n2.p39-47](https://doi.org/10.21168/rbrh.v10n2.p39-47)

RIBEIRO, H. J.; FERREIRA, N. C. Análise comparativa de redes hidrológicas geradas a partir de superfícies hidrologicamente consistentes. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 20, n. 4, p. 784-805, 2014. DOI: [10.1590/S1982-21702014000400045](https://doi.org/10.1590/S1982-21702014000400045)

SAITO, N. S. 2011. 120 f. **Modelos digitais de elevação na sub-bacia hidrográfica do córrego Horizonte, Alegre - Espírito Santo**. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Programa de Pós Graduação em Ciências Florestais, Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2011.

SUBRAMANIAN, K. S. S.; SINGH, A.; SUDHAKAR, M. **Evaluation of digital elevation models created from different satellite images**. 2005. Disponível em:

<http://www.gisdevelopment.net/technology/rs/pdf/79.pdf>

VON SPERLING, M. V. **Estudos e modelagem da qualidade da água de rios**. Belo Horizonte: UFMG, p. 588, 2007.



WECHSLER, S. P. Uncertainties associated with digital elevation models for hydrologic applications: a review. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, n. 4, p. 1481-1500, 2007. DOI: [10.5194/hess-11-1481-2007](https://doi.org/10.5194/hess-11-1481-2007)

WILSON, J. P. Digital terrain modeling. **Geomorphology**, v. 137, n. 1, p. 107-121, 2012. DOI: [10.1016/j.geomorph.2011.03.012](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.03.012)