



Revista Brasileira de Cartografia (2014) N^o 66/1, p. 1-14
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA VERTICAL DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO (MDES) NAS BACIAS DO PARANOÁ E SÃO BARTOLOMEU

Evaluation of Digital Elevation Models (DEM) Vertical Accuracy in the Paranoá and São Bartolomeu River Basins

Leonardo Zandonadi Moura¹, Edilson de Souza Bias², Ricardo Brites²

¹Ministério do Meio Ambiente – MMA

Departamento de Desenvolvimento Rural Sustentável – DRS/SEDR

Esplanada dos Ministérios, bloco B, Sala 732 – CEP: 70.068-900 – Brasília, DF, Brasil

lzandonadimoura@gmail.com

²Universidade de Brasília – UNB

Instituto de Geociências

Campus Universitário Darcy Ribeiro, Caixa-Postal: 4465, Asa Norte - CEP 70910-900 - Brasília, DF, Brasil

edbias@unb.br, brites@unb.br

Recebido em 14 de Janeiro, 2013/ Aceito em 22 de Setembro, 2013

Received on January 14, 2013/ Accepted on September 17, 2013

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo fazer uma análise comparativa entre Modelos Digitais de Elevação (MDE) de abrangência global ou nacional, disponíveis gratuitamente na web: ASTER-GDEM, SRTM 4, TOPODATA, HydroSHEDS e um Modelo oriundo de interpolação de mapeamento na escala de 1:10000. Esta análise foi realizada para duas bacias hidrográficas com características de relevo diferentes: a bacia do Rio Paranoá, que possui relevo suave e densidade de drenagem baixa e a do Rio São Bartolomeu, que apresenta relevo movimentado, com alta densidade de drenagem. O método consiste no uso do Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais – PEC-PCD, descrito na versão 2.1.3 da Especificação Técnica para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-ADGV) e teste estatístico do parâmetro t de Student. Na bacia do Paranoá os MDEs TOPODATA, SRTM e HydroSHEDS dem enquadraram-se na escala 1:50000 classe B, enquanto o ASTER e o HydroSHEDS con enquadraram-se na escala 1:100000 classe B. Apenas os MDEs SRTM e HydroSHEDS dem não apresentaram tendências sistemáticas. Na bacia do São Bartolomeu os MDEs TOPODATA, SRTM e ASTER atenderam à escala 1:100000 classe B, enquanto o HydroSHEDS dem atendeu a 1:100000 classe D e o HydroSHEDS con a 1:250000 classe B. Apenas o MDE ASTER não apresentou tendências sistemáticas.

Palavras chaves: PEC-PCD, MDE, SRTM 4, ASTER, TOPODATA, HydroSHEDS.

ABSTRACT

This paper had the objective of making a comparative analysis among Digital Elevation Models (DEM) of global or national scope freely available on the web: ASTER-GDEM, SRTM 4, TOPODATA, HydroSHEDS and a Model produced by interpolation of a topographical map on the scale of 1:10000. This analysis was conducted for two river

basins with different relief characteristics: the Paranoá river basin has a smooth relief and low drainage density, while the São Bartolomeu river basin has a mountainous terrain with high drainage density. The method consists on the use of the Cartographic Accuracy Standard for Digital Cartographic Products (PEC-PCD), described in the version 2.1.3 of the Technical Specification for the Acquisition of Vector Geospatial Data (ET-ADGV) and statistical test of the Student's t parameter. In the Paranoá basin the TOPODATA, SRTM and HydroSHEDS dem DEMs have fulfilled the 1:50000 scale, class B standard, while ASTER and HydroSHEDS con were 1:100000 scale, class B standard. Only the DEMs SRTM and HydroSHEDS dem didn't show systematic biases. In the São Bartolomeu Basin the DEMs TOPODATA, SRTM and ASTER have fulfilled scale 1:100000, class B, while HydroSHEDS dem was 1:100000 class D and HydroSHEDS con reached 1:250000 class B. Only the ASTER DEM didn't present systematic biases.

Keywords: PEC-PCD, DEM, SRTM 4, ASTER, TOPODATA, HydroSHEDS.

1. INTRODUÇÃO

Cada vez mais informações topográficas estão disponíveis para os usuários de geoinformação. Modelos Digitais de Elevação (MDE) de abrangência global, produzidos por diversas técnicas, foram disponibilizados à comunidade na última década. É importante discutir suas possíveis aplicações, decorrentes de sua acurácia, para melhor aproveitar seu potencial.

O objetivo deste trabalho é avaliar o grau de acurácia dos seguintes Modelos Digitais de Elevação publicamente disponíveis: SRTM 4 (Sub-produto do SRTM 1 trabalhados pela CGIAR-CSI), TOPODATA (VALERIANO, M. M. & ROSSETTI, D. F., 2008), ASTER (Fonte: METI - Japan's Ministry of Economy, Trade and Industry e NASA, 2004) e HydroSHEDS (Fonte: LEHNER, B., VERDIN, K., JARVIS, A., 2008). Suas características são resumidas na TABELA 1.

Além dessas fontes, foi produzido um MDE a partir de interpolação de dados topográficos (TERRACAP, 2010), com resolução de 6 metros. Este MDE foi utilizado como referência nas análises subsequentes. Os dados topográficos são disponibilizados em escala 1:10000, PEC-A, referenciadas ao Sistema SIRGAS-2000,4. A base utilizada foi fornecida diretamente pela TERRACAP, porém está disponível na internet no site da Secretaria de Habitação, Regularização e Desenvolvimento Urbano do Distrito Federal – SEDHAB DF.

Para avaliar os modelos foram selecionadas como áreas de interesse duas bacias hidrográficas do Distrito Federal, dos Rios Paranoá e São

Bartolomeu, cujos limites foram extraídos do mapa de regiões hidrográficas, proveniente do SITURB – Sistema de Informação Territorial e Urbana do DF. Sua localização é ilustrada na Fig. 1. As duas bacias possuem características morfológicas diferentes: a bacia do Paranoá apresenta mais áreas planas e baixa densidade de drenagem, enquanto a do São Bartolomeu apresenta maiores variações da altitude e declividade e alta densidade de drenagem. Estas áreas foram escolhidas para verificar as diferenças de qualidade dos MDEs de acordo com a característica do relevo local.

Esta escolha também favoreceu o trabalho, dividindo em etapas o esforço computacional necessário para realizar a interpolação do MDE com resolução de 6 m utilizando a ferramenta Topo to Raster do ArcGIS® 10.1. O trabalhoso processo de correção para garantir dados topográficos e de hidrografia com consistência topológica foi dividido em etapas da mesma maneira.

1.1 Bacia Hidrográfica do Rio Paranoá

A única bacia totalmente inserida no Distrito Federal, com área de aproximadamente 1004,7 km². Apresenta maior densidade populacional, abarcando a maior porção das regiões administrativas (RAs) de Brasília, Lago Norte, Lago Sul, Núcleo Bandeirante, Riacho Fundo, Candangolândia, Cruzeiro e Guará, além de parte da RA de Taguatinga.

A ocupação desta bacia se divide entre 30% de áreas urbanas, 26% de formações savânicas e 25% de formações campestres. Aproximadamente 5% da área da bacia são ocupados por corpos d'água, com o lago

Tabela 1: Principais características dos MDEs avaliados

Modelo	Resolução espacial (m)	Técnica Utilizada	Processamento
SRTM v4	90	Interferometria SAR	Preench. vazios, correções em corpos d'água e linha de costa, etc.
TOPODATA	30	Interferometria SAR	Krigagem
HydroSHEDS dem	90	Interferometria SAR	Preenchimento de vazios.
HydroSHEDS con	90	Interferometria SAR	Condicionamento hidrológico, aprofundamento de corpos d'água.
ASTER v2	30	Estereoscopia	Correção de efeitos de <i>striping</i> , preench. vazios, etc.

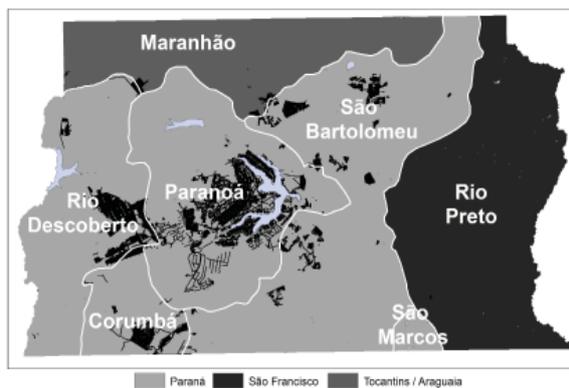


Fig. 1 – Área de interesse deste trabalho: Bacias do Rio Paranoá e do Rio São Bartolomeu.

Paranoá e o lago Santa Maria se destacando, este último sendo a principal fonte de água para o Plano Piloto. O Parque Nacional de Brasília, importante área de conservação do DF, está no interior desta Bacia.

1.2 Bacia Hidrográfica do Rio São Bartolomeu

A bacia hidrográfica do rio São Bartolomeu é a maior do Distrito Federal, drenando 27,2% do seu território, uma área de 1579,2 km², segundo o Comitê de Bacia Hidrográfica do Rio Paranoá (2009). Nela estão inseridas as regiões administrativas de Brasília, Guará, Riacho Fundo, Cruzeiro, Candangolândia, Lago Sul, Núcleo Bandeirante e Lago Norte e parte das RAs de Sobradinho, Planaltina Paranoá, São Sebastião, Santa Maria e Taguatinga.

O rio São Bartolomeu corta o Distrito Federal no Sentido Norte-Sul, tendo como principais afluentes o ribeirão Sobradinho, que banha a cidade-satélite de mesmo nome, o ribeirão Mestre D'armas, que banha a cidade-

satélite de Planaltina e os rios Paranoá e Pípiripau que abastecem Planaltina e Vale do Amanhecer.

Sua bacia é uma das áreas de maior interesse para o futuro abastecimento de água do DF, e já apresenta problemas devido à captação de águas superficiais sem planejamento, razão para um projeto de cadastro de usuários feito em parceria entre a Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos – SEMARH/DF e a Agência Nacional de Águas – ANA.

É uma das regiões do DF que estão sob maior pressão por expansão urbana. Nela estão localizados cerca de 70% dos condomínios horizontais do DF (ROIG et al. 2009), alguns deles provenientes de loteamentos irregulares e em regiões com restrições ambientais. Na bacia existe uma APA – Área de Proteção Ambiental da Bacia do Rio São Bartolomeu, um tipo de unidade de conservação de uso sustentável com os objetivos básicos de proteger a diversidade biológica, disciplinar o processo de ocupação e assegurar a sustentabilidade do uso dos recursos naturais.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Subtração entre MDEs

A sequência de operações realizada para a subtração entre os rasters (MDEs) para avaliação das diferenças de elevação é ilustrada na Fig. 2. Este processo é utilizado a partir do exemplo de outros trabalhos com temática similar (MOURATIDIS et al. 2010, HIRT et al. 2010). Ao realizar a subtração entre rasters de resoluções diferentes, aquele com a maior resolução é reamostrado para a menor, ou seja, ao comparar um MDE com pixel de 90 m com um de 30 m,

o resultado tem pixels de 90 m.

Para os MDEs globais, os dados são disponibilizados no formato de cenas, com coordenadas geográficas (latitude/longitude), com datum horizontal WGS84, e a elevação é referenciada ao geóide EGM96 (Datum vertical do WGS84). Este referencial altimétrico é diferente do utilizado no Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), que é o Datum de Imbituba. De acordo com alguns outros trabalhos (LUZ et. al., 2002 e MICELI et. al., 2011 apud BARROS et. al., 2007), as diferenças entre as altitudes nestas referências é da ordem de 0,10 a 0,54 m. Ocasionalmente o contorno das bacias de interesse abrangeu áreas em mais de uma cena dos MDEs. Nesse caso, foi necessário produzir um mosaico com as cenas relevantes.

Para todas as operações de avaliação de acurácia, os dados foram inicialmente reprojatados para coordenadas UTM, datum SIRGAS 2000, utilizando a ferramenta *Project* do software ArcGIS® 10.1, com o parâmetro *resample* (reamostragem) selecionado em *nearest* (vizinho mais próximo). Esta transformação foi realizada apenas para as coordenadas planimétricas. Não foram realizadas transformações da referência (Datum) vertical, a exemplo dos trabalhos de Rodrigues (2010) e Miceli et. al. (2011).

Após a realização destas operações, os MDEs foram recortados utilizando os polígonos de contorno das bacias como máscara, através da ferramenta *Extract by mask* do mesmo software.

Na produção do MDE por interpolação, foram necessárias correções topológicas dos dados de entrada, especialmente da hidrografia, utilizando no aplicativo ArcGIS® 10.1 as regras *must not have dangles*, *must not overlap*, *must not self-overlap* e *must not self-intersect*, além de garantir consistência hidrológica, ou seja, que o sentido de vetorização das linhas segue a direção do fluxo da água. Para os pontos cotados foi necessário remover aqueles com valores

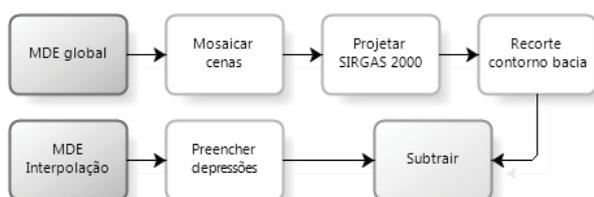


Fig. 2 – Fluxograma das operações realizadas na comparação entre MDEs.

espúrios.

2.2 Avaliação do PEC-PCD

Neste trabalho os MDEs foram avaliados segundo o Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais - PEC-PCD, publicado na versão 2.1.3 da Especificação Técnica para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-ADGV) (BRASIL, 2011).

Na metodologia utilizada para o cálculo, calcula-se o erro na altitude (DH) subtraindo-se do valor de referência (H_{REF}) o valor do dado que se deseja avaliar (H_{MDE}), segundo a equação (1):

$$DH = H_{REF} - H_{MDE} \quad (1)$$

O comportamento dessas diferenças é então avaliado estatisticamente, primeiramente quanto à existência de erros sistemáticos e, posteriormente, quanto à aderência ao Padrão.

A avaliação da existência de tendências sistemáticas é realizada através do teste “t” de Student. O valor de “t” amostral é obtido através de:

$$t_x = \frac{\overline{DH}}{S_{DH}} n^{1/2} \quad (2)$$

Em que DH é a média dos erros e S_{DH} é o desvio padrão do conjunto dos erros e n é o número de pontos em que os erros foram avaliados. O intervalo de confiança do teste “t” de Student é dado por:

$$|t_x| < t_{(n-1, \alpha/2)} \quad (3)$$

Se o módulo do valor calculado de “t” for menor que o valor de “t” tabelado para n-1 graus de liberdade e nível de significância α , considera-se o produto livre de tendências sistemáticas.

A análise de precisão é realizada pela comparação entre o desvio padrão dos erros com o Erro Padrão (EP) especificado pelo PEC-PCD para cada escala e classe. O teste de hipótese realizado é:

$$H_0: S_{DH}^2 = \sigma_H^2 \quad (4)$$

$$H_1: S_{DH}^2 > \sigma_H^2$$

No qual σ_H corresponde ao desvio padrão esperado para a coordenada x em questão. Em seguida aplica-se o teste Qui-quadrado amostral, no qual o parâmetro Qui-quadrado (χ^2) é calculado através de:

$$\sigma_x = \frac{EP}{\sqrt{2}}$$

$$\chi^2_x = (n-1) \frac{S_{DH}^2}{\sigma_x^2} \tag{5}$$

Se o valor de Qui-quadrado calculado for maior que o tabelado com n-1 graus de liberdade a um intervalo de confiança α , então o produto não atende à precisão da escala e classe em análise.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Subtração entre MDEs

Observa-se na Fig. 3 e na Tabela 2, que há diferenças significativas entre os Modelos Digitais de Elevação - MDEs Topodata (SRTM), ASTER, SRTM v.4 e HydroSHEDS em relação ao produzido por interpolação (subtraiu-se do valor de altitude dos MDEs o valor da interpolação), para a bacia do Paranoá. De modo geral, os dados provenientes do SRTM e produtos derivados (Topodata e HydroSHEDS) apresentaram-se mais precisos, ou seja, com menos erros aleatórios, o que caracteriza-se por um desvio padrão menor e uma amplitude menor das diferenças dos valores de elevação.

O menor desvio padrão dos erros (3,64) foi encontrado no Topodata, e o maior para o ASTER (6,58). Enquanto as diferenças entre o MDE Topodata e o MDE produzido por interpolação tiveram uma amplitude de 96,16 metros (de -29,90 m a +66,26 m), as do MDE ASTER resultaram em uma amplitude de 249,00 metros (de -133,94 m a 115,06 m). A menor amplitude de diferenças encontrada foi a do MDE HydroSHEDS con, de 62,53 metros (-31,78 a 30,75).

O comportamento das diferenças de

elevação para a bacia do São Bartolomeu é retratado na Fig. 4 e na Tabela 3. O comportamento dos dados é diferente daquele na bacia do Paranoá, pois os produtos SRTM não apresentam a mesma superioridade em precisão ou qualidade. O MDE Topodata continua sendo o mais preciso, com o menor desvio padrão (4,91) e amplitude do histograma de diferenças de 138,55 metros. No entanto, os dados ASTER nesta bacia apresentam o segundo menor desvio padrão (6,77), tendo os dados HydroSHEDS con o maior valor (9,19), sendo portanto os menos precisos.

O esperado era que os MDEs analisados, que são na verdade modelos digitais de superfície – MDS, possuíssem de modo geral valores de elevação superiores ao MDE produzido por interpolação, que é um modelo digital de terreno. Essa expectativa deve-se ao fato de que um MDS representa as elevações dos objetos sobre o terreno, como prédios e copas densas de árvores, e não a elevação do solo, que é representada no MDT. Esta expectativa não se cumpre apenas para o HydroSHEDS con. Conforme se observa nas Fig. 3 e 4, os histogramas de diferenças de elevação são assimétricos. Enquanto os outros MDEs possuem mais valores positivos (cerca de 65% a 80% dos valores) e média das diferenças de elevação positiva (Tabelas 2 e 3), o HydroSHEDS con possui mais valores negativos (55% a 65%) e média negativa. Observa-se nos histogramas de diferenças de elevação a ocorrência de “picos”, ou seja, classes de diferenças que possuem maior número de eventos. Estes picos ocorrem geralmente na classe que corresponde a diferença de 0 (zero) metros, mostrando que nos diferentes modelos a altimetria é igual à do MDE interpolado (resolução de 6 m) em grande parte (9 a 22%) da área das bacias.

Tabela 2: Estatísticas básicas - subtração entre MDEs (global – interpolação) para a Bacia do Paranoá (diferenças em metros).

	SRTM v4	TOPODATA	ASTER	HydroSHEDS dem	HydroSHEDS con
Mínimo	-24,78	-29,9	-96,05	-25,78	-31,78
Máximo	39,75	66,26	127,06	38,75	30,75
Média	3,14	2,9	5,29	2,76	-0,72
Desvio Pad.	4,06	3,64	6,58	4,25	5,61

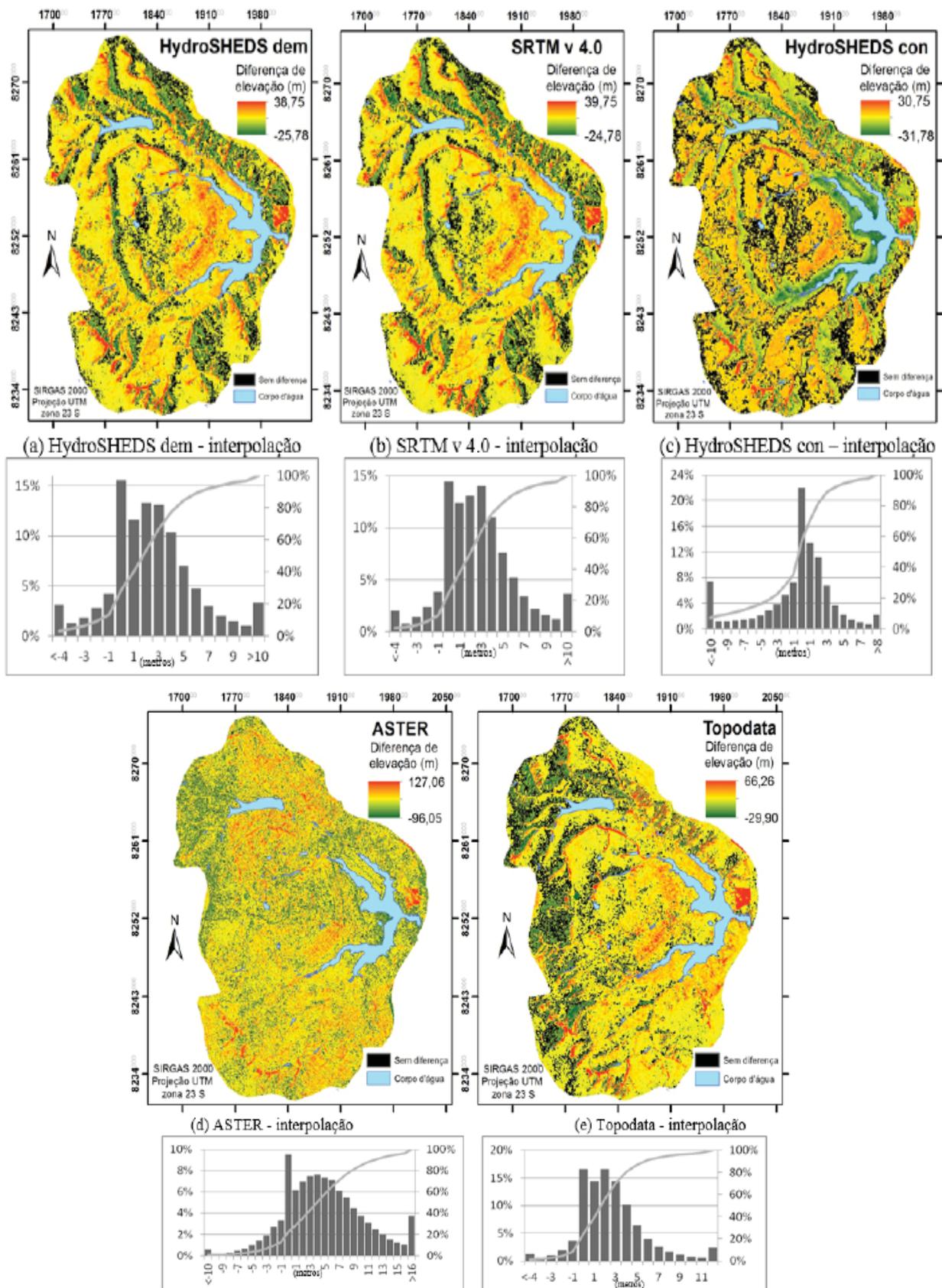


Fig. 3 – Resultados da subtração entre MDEs de diferentes origens para a bacia do Paranoá: (a) HydroSHEDS dem - interpolação ; (b) SRTM v 4.0 - interpolação; (c) HydroSHEDS con – interpolação; (d) ASTER - interpolação; (e) Topodata - interpolação. Histogramas de diferenças de elevação em metros (escala embaixo), com frequência de cada classe à esquerda e frequência acumulada à direita.

Tabela 3: Estatísticas básicas - subtração entre MDEs para a Bacia do São Bartolomeu (diferenças em metros)

	SRTM v4	TOPODATA	ASTER	HydroSHEDS dem	HydroSHEDS con
Mínimo	-51,13	-53,98	-42,58	-52,67	-73,53
Máximo	59,55	84,57	85,83	59,06	52,06
Média	3,23	2,87	2,31	2,92	-3
Desvio Pad.	7,57	4,91	6,77	7,6	9,19

3.2 Avaliação do PEC-PCD

Observa-se na Fig. 5 os vértices disponíveis para avaliação do Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD) para os MDEs de diversas fontes. Das Tabelas 5 e 8 tem-se 18 pontos para a bacia do Paranoá e 24 para a bacia do São Bartolomeu. A distribuição dos pontos nas bacias não é uniforme, de modo que os cálculos com as altitudes dos diversos MDEs podem apresentar tendências ou não representar a totalidade dos erros de altitude na bacia, como faz a comparação entre os rasters. No entanto, considera-se que devido à grande precisão (da ordem de 0,1 m) das coordenadas planimétricas e altitude dos vértices, o PEC-PCD calculado com estes dados é um bom indicativo da acurácia dos diversos modelos.

Na Tabela 6 observa-se o comportamento dos erros de altitude na bacia do Paranoá. O valor máximo de DH dentre todos os MDEs analisados foi do HydroSHEDS dem, 15,376 metros. O valor mínimo foi do ASTER, -15,559 metros. A partir dos valores dos parâmetros erro RMS (RMSE) e variância, se pode inferir que o MDE produzido por interpolação apresentou a maior acurácia (menores valores), enquanto o HydroSHEDS con apresentou a pior. Em ordem decrescente de acurácia, tem-se: Interpolação, Topodata, SRTM, HydroSHEDS dem, ASTER, HydroSHEDS con.

A partir do cálculo do parâmetro t de Student e comparação com valores tabelados resulta que apenas os MDEs SRTM e HydroSHEDS dem não apresentam tendências sistemáticas. Todos os outros apresentaram valores de t calculados superiores em módulo ao valor tabelado para 17 graus de liberdade e 10% de significância (t tabelado = 1,740) e portanto contém erros sistemáticos. Realizando uma análise de sensibilidade (somando às diferenças de altitude

-0,54 m ou 0,54 m) quanto à diferença entre os referenciais altimétricos EGM 96 e Imbituba, encontrou-se que ao somar -0,54 m o SRTM apresentou erros sistemáticos.

A partir dos erros encontrados, realizou-se a análise do PEC-PCD por meio de testes de hipóteses, mais precisamente pelo teste de precisão com cálculo do parâmetro Qui-quadrado e comparação com o valor tabelado para 17 graus de liberdade e 10% de significância. As escalas encontradas variam de 1:10000 a 1:100000, com maior frequência da escala 1:50000 (Topodata, SRTM, HydroSHEDS dem e ASTER), vide Tabela 4.

Na Tabela 9 observa-se o comportamento dos erros de altitude na bacia do São Bartolomeu. Houve diferenças consideráveis em relação ao verificado na bacia do Paranoá. De modo geral, a performance dos MDEs piorou, e a magnitude das diferenças aumentou, com um valor máximo de DH dentre todos os MDEs analisados no HydroSHEDS dem, 58.296 metros. O valor mínimo foi do ASTER, -11.431 metros. A partir dos valores dos parâmetros erro RMS (RMSE) e variância, se pode inferir que o MDE produzido por interpolação apresentou a maior acurácia (menores valores), enquanto o HydroSHEDS con apresentou a pior. O MDE ASTER neste caso apresentou uma acurácia melhor do que na bacia do Paranoá. Os modelos em ordem decrescente de acurácia são: Interpolação, Topodata, ASTER, SRTM, HydroSHEDS dem, HydroSHEDS con.

A partir do cálculo do parâmetro t de Student e comparação com valores tabelados resulta que apenas o MDE ASTER não apresentou tendências sistemáticas. Todos os outros apresentaram valores de t calculados superiores em módulo ao valor tabelado para 23 graus de liberdade e 10% de significância (t tabelado = 1.714) e portanto contém erros sistemáticos.

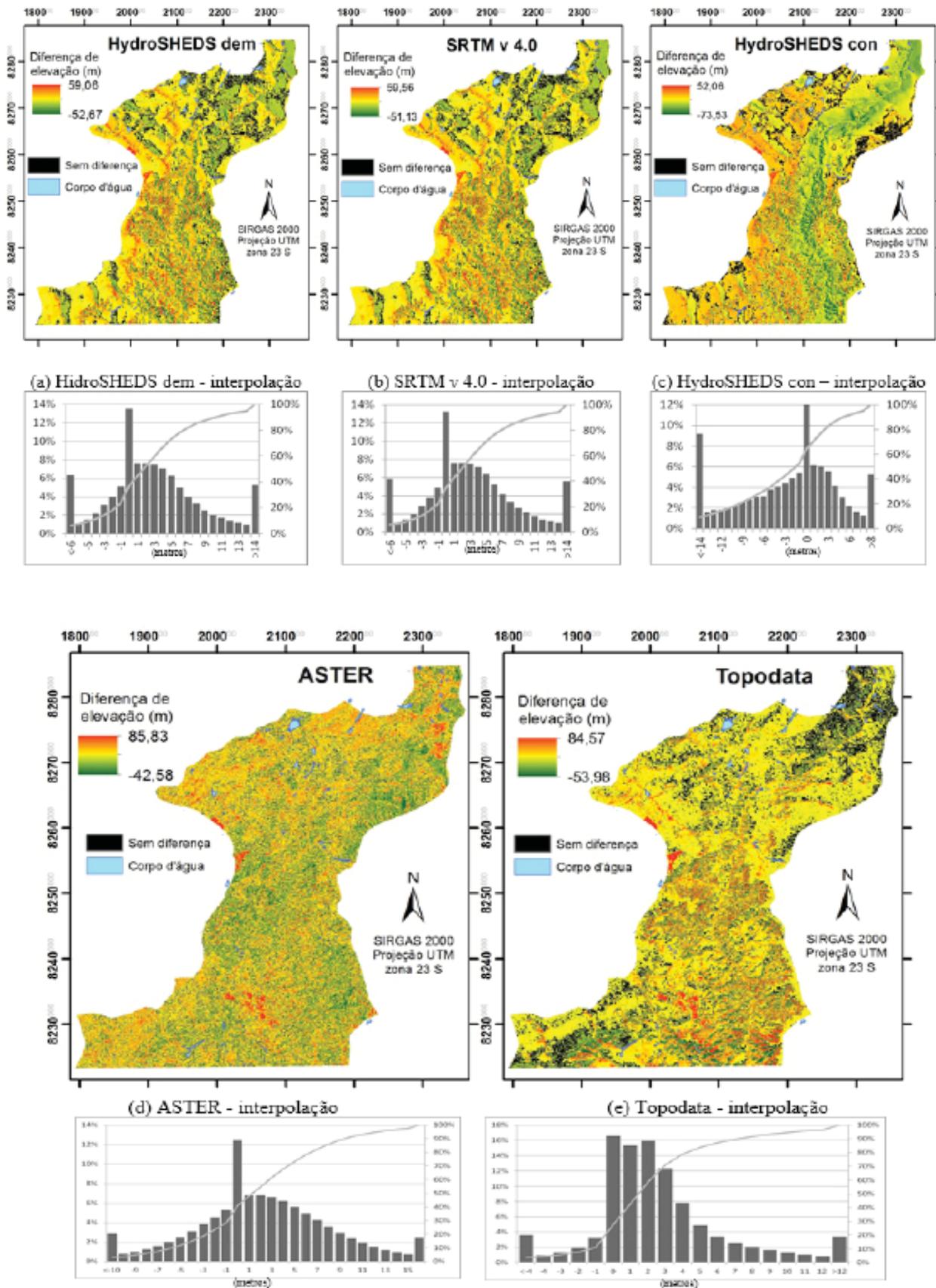


Fig. 4 – Resultados da subtração entre MDVs de diferentes origens para a bacia do São Bartolomeu: (a) HidrosHEDS dem - interpolação ; (b) SRTM v 4.0 - interpolação; (c) ‘HydroSHEDS con – interpolação; (d) ASTER - interpolação ; (e) Topodata - interpolação. Histogramas de diferenças de elevação em metros (escala embaixo), com frequência de cada classe à esquerda e frequência acumulada à direita.

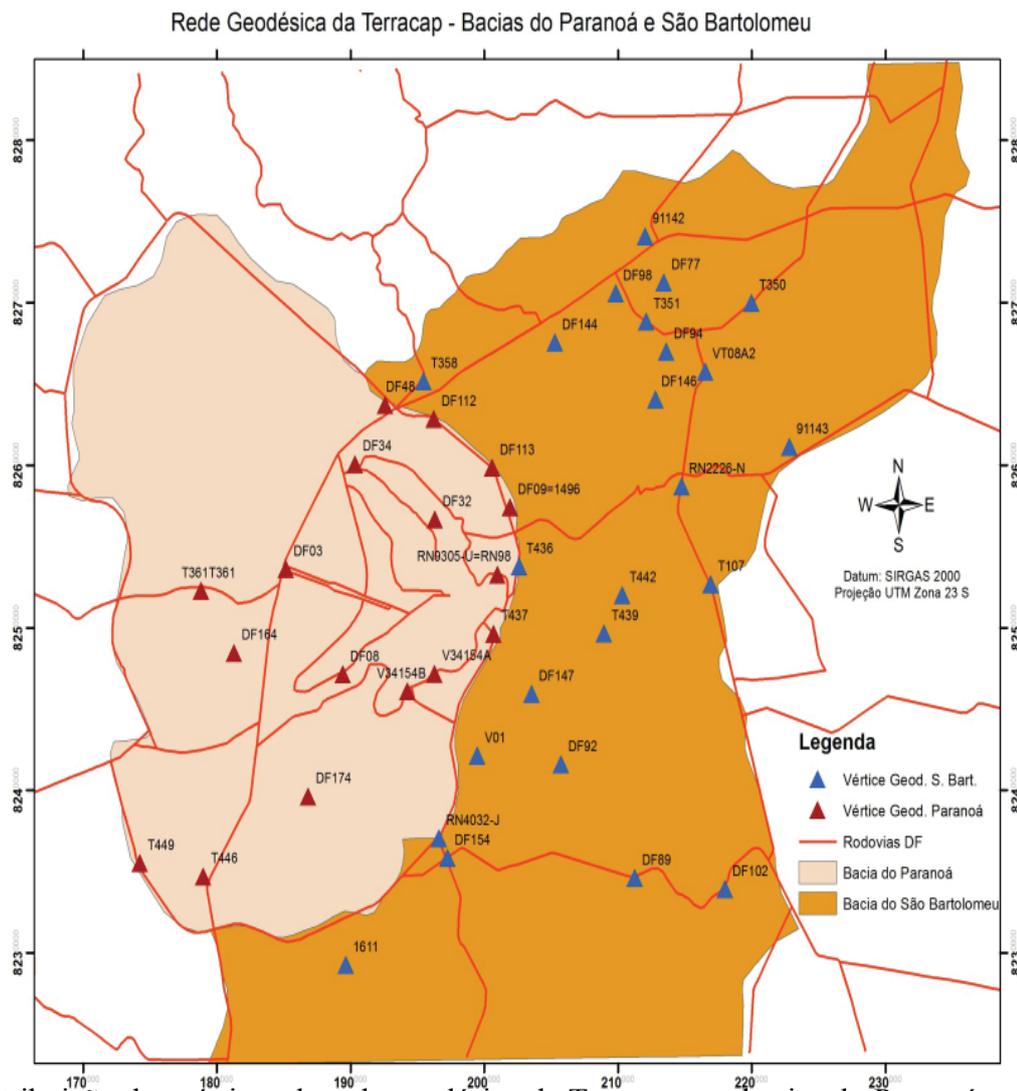


Fig. 5 – Distribuição dos vértices da rede geodésica da Terracap nas bacias do Paranoá e do São Bartolomeu.

Tabela 4: PEC-PCD dos MDES analisados na Bacia do Partanoá

MDE	Interpolação		MDE	Topodata	
Escala	1:10000	1:25000	Escala	1:25000	1:50000
PEC-PCD	B	A	PEC-PCD	D	B
MDE	SRTM		MDE	ASTER	
Escala	1:50000	1:100000	Escala	1:50000	1:100000
PEC-PCD	B	A	PEC-PCD	D	B
MDE	Dem		MDE	con	
Escala	1:50000	1:100000	Escala	1:100000	
PEC-PCD	B	A	PEC-PCD	B	

Realizando uma análise de sensibilidade (somando às diferenças de altitude -0,54 m ou 0,54 m) quanto à diferença entre os referenciais altimétricos EGM 96 e Imbituba, encontrou-se que ao somar 0,54 m o ASTER apresentou erros sistemáticos.

A partir dos erros encontrados, realizou-se a análise do PEC-PCD por meio de testes

de hipóteses, mais precisamente pelo teste de precisão com cálculo do parâmetro Qui-quadrado e comparação com o valor tabelado para 23 graus de liberdade e 10% de significância. As escalas encontradas variam de 1:10000 a 1:250000, com maior frequência da escala 1:100000 (Topodata, SRTM, HydroSHEDS dem e ASTER), vide Tabela 7.

Tabela 5 – Vértices geodésicos da TERRACAP situados na Bacia do Paranoá

ID Vértice	Coordenadas SIRGAS 2000		Altitude (m)	
	Norte (m)	Este (m)	Geométrica	Ortométrica
T361	8252265,437	178831,579	1096,294	1108,845
T449	8235502,458	174264,672	1225,859	1238,155
T446	8234683,491	179004,938	1176,080	1188,525
DF174	8239616,573	186840,884	1079,577	1092,168
DF08	8247117,909	189425,275	1005,135	1017,803
V34154B	8246081,757	194257,776	1002,720	1015,441
V34154A	8247164,264	196289,318	1015,342	1028,089
T361	8252265,437	178831,579	1096,294	1108,845
DF164	8248446,525	181301,019	1081,962	1094,526
DF03	8253603,078	185175,115	1112,114	1124,752
DF48	8263705,215	192601,797	1219,933	1232,846
DF112	8262842,624	196237,312	1200,566	1213,491
DF34	8260067,060	190361,212	1071,567	1084,384
DF32	8256650,468	196331,113	1024,581	1037,376
DF113	8259843,776	200597,618	1146,755	1159,653
DF09=1496	8257409,758	201952,710	1174,062	1186,920
RN9305- U=RN98	8253267,110	200995,465	1059,971	1072,286
T437	8249627,258	200696,412	1087,622	1100,427

5. CONCLUSÃO

As avaliações realizadas indicaram que os MDEs globais possuem aplicações possíveis em escalas de 1:25000 e menores. Em uma bacia de relevo pouco movimentado, os resultados mostraram compatibilidade com escala de até 1:50000 para os MDEs Topodata, SRTM, HydroSHEDS dem e ASTER. Já em uma bacia com maiores declividades e maior densidade de drenagem, os resultados indicaram escala de 1:100000 e menores.

A avaliação do PEC-PCD apresentou limitações, especialmente pela quantidade limitada de vértices geodésicos disponíveis e sua distribuição não-homogênea nas bacias analisadas. No entanto, considera-se que os resultados são um bom indicativo da acurácia dos MDEs, especialmente quando combinados com a comparação com um MDE de melhor resolução por meio de álgebra de mapas (subtração entre rasters).

A subtração entre os rasters permitiu observar a distribuição dos erros de elevação nas bacias e as limitações dos MDEs avaliados decorrentes de sua resolução e das técnicas utilizadas para aquisição dos dados. A resolução

impede que sejam captadas as nuances do relevo ligadas a linhas de drenagem mais estreitas. O fato dos MDEs globais serem na realidade Modelos Digitais de Superfície MDS fica claro nas regiões urbanas e de silvicultura, nas quais a elevação captada representa os edifícios e árvores, e não o solo.

Dentre os MDEs globais, o Topodata apresentou a melhor acurácia, e o HydroSHEDS con a pior. No entanto, deve-se considerar que os autores do HydroSHEDS con recomendam sua aplicação especialmente em modelagens hidrológicas, pois as modificações utilizadas para garantir sua consistência hidrológica alteram os valores de elevação de maneira drástica.

AGRADECIMENTOS

Ao Ministério do Meio Ambiente por apoiar o desenvolvimento deste trabalho através do seu Programa de Incentivo à Pós-Graduação. Também aos colegas de trabalho Felipe Barbosa e Rejane Cicerelli pelo apoio e idéias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTER VALIDATION TEAM, METI, NASA, USGS, NGA. **ASTER Global DEM Validation**

Tabela 6: Erros na altitude fornecida por diversos MDEs NOS vértices geodésicos e verificação da existência de erros sistemáticos através do cálculo do parâmetro T de STUDENT – Bacia do Paranoá

	DH Interpolação	DH Topodata	DH dem	DH con	DH SRTM	DH ASTER
T361	-0,015	-1,255	-0,155	1,845	-0,155	-3,155
T449	1,545	-4,115	-0,845	0,155	-1,845	-7,845
T446	-0,015	-2,785	-1,475	1,525	-1,475	-5,475
DF174	0,158	3,508	0,168	5,168	0,168	-5,832
DF08	0,033	0,253	-1,197	14,803	-1,197	-3,197
V34154B	0,261	-2,989	-3,559	3,441	-3,559	-15,559
V34154A	-0,011	-5,121	2,089	12,089	1,089	-2,911
T361	-0,015	-1,255	-0,155	1,845	-0,155	-3,155
DF164	0,196	-1,004	-6,474	-3,474	-7,474	-4,474
DF03	-0,188	-2,718	-4,248	-0,248	-3,248	-3,248
DF48	0,016	-0,964	3,846	8,846	3,846	0,846
DF112	0,011	-1,549	-1,509	-0,509	-1,509	-0,509
DF34	0,494	2,164	6,384	12,384	5,384	2,384
DF32	1,286	0,716	2,376	15,376	2,376	2,376
DF113	0,143	-7,327	-6,347	-5,347	-6,347	-13,347
DF09=1496	0,030	-1,450	-0,080	0,920	-0,080	-1,080
RN9305-U=RN98	-0,024	-4,114	-0,714	2,286	-0,714	1,286
T437	-0,083	-3,033	-0,573	0,510	1,460	0,000
MÉDIA	0,212	-1,835	-0,693	3,979	-0,746	-3,494
DESVIO PADR.	0,465	2,585	3,230	6,152	3,180	4,913
VARIÂNCIA	0,216	6,680	10,432	37,847	10,115	24,134
MÁXIMO	1,545	3,508	6,384	15,376	5,384	2,384
MÍNIMO	-0,188	-7,327	-6,474	-5,347	-7,474	-15,559
RMSE	0,499	3,111	3,214	7,181	3,180	5,916
CALCULO T	1,939	-3,013	-0,910	2,744	-0,996	-3,018

Tabela 7: PEC-PCD dos MDEs analisados na Bacia do São Bartolomeu.

MDE Escala PEC-PCD	Interpolação		MDE Escala PEC-PCD	Topodata
	1:10000 B	1:25000 A		1:100000 B
MDE Escala PEC-PCD	SRTM 1:100000 B		MDE Escala PEC-PCD	ASTER 1:100000 B
MDE Escala PEC-PCD	Dem 1:100000 D		MDE Escala PEC-PCD	con 1:250000 B

Summary Report. June 2009. 28p. Disponível em <<https://lpdaac.usgs.gov>>. Acesso: 04 dezembro 2012.

BRASIL. Especificação Técnica para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-ADGV) Versão 2.1.3. Diretoria de Serviço Geográfico do Exército Brasileiro. 2011.

Disponível em <<http://www.geoportal.eb.mil.br/index.php/inde2?id=140>>. Acesso: 04 dezembro 2012.

Comitê de Bacia Hidrográfica do Rio Paranoá. 2009. Disponível em <<http://www.cbhparanoa.df.gov.br/default.asp>>. Acesso: 04 dezembro 2012.

Tabela 8: Vértices geodésicos da TERRACAP situados na Bacia do São Bartolomeu

ID	Coordenadas SIRGAS 2000		Altitude (m)	
	Norte (m)	Este (m)	Geométrica	Ortométrica
T358	8265178,373	195460,149	1149,036	1162,001
T436	8253765,215	202602,849	1097,731	1110,569
1611	8229256,699	189649,096	1199,965	1212,520
RN4032-J	8237031,485	196599,950	1154,894	1167,617
DF154	8235840,846	197247,363	1135,512	1148,227
V01	8242134,974	199488,170	1080,690	1093,460
DF147	8245925,243	203540,815	1008,451	1021,278
DF92	8241577,494	205732,570	995,647	1008,476
DF89	8234603,681	211259,115	1006,202	1019,039
DF102	8233894,814	218015,884	1005,744	1018,636
T439	8249642,764	208964,883	963,595	976,491
T442	8251994,082	210307,964	928,078	940,997
T107	8252677,243	216919,369	1014,951	1027,935
RN2226-N	8258700,416	214768,125	910,857	923,848
DF144	8267561,915	205279,150	1204,239	1217,314
DF146	8264055,215	212819,175	1021,083	1034,152
VT08A2	8265761,546	216523,711	912,004	925,129
91143	8261135,857	222818,248	1165,600	1178,720
DF98	8270574,610	209843,363	1060,512	1073,671
T351	8268831,270	212105,603	952,364	965,510
DF94	8267000,402	213622,200	1032,170	1045,295
T350	8269987,273	219988,922	1029,349	1042,571
91142	8274079,175	212042,785	1000,260	1013,380
DF77	8271250,013	213437,898	948,660	961,857

HIRT, C. FILMER, M.S. FEATHERSTONE, W.E. **Comparison and validation of the recent freely-available ASTER-GDEM ver1, SRTM ver4,1 and GEODATA DEM-9S ver3 digital elevation models over Australia.** 2010. Disponível em <http://www.cage.curtin.edu.au/~will/final_AJES_DEM_v15012010.pdf>. Acesso: 10 dezembro 2012.

JARVIS, A. REUTER, H.I. NELSON, A. GUEVARA, E. **Hole-filled seamless SRTM data V4, International Centre for Tropical Agriculture (CIAT).** 2008. Disponível em <<http://srtm.csi.cgiar.org>>. Acesso: 04 dezembro 2012.

LEHNER, B., VERDIN, K., JARVIS, A. New Global Hydrography Derived From Spaceborne Elevation Data. **Eos, Transactions, AGU**, 89(10): 93-94, 2008.

LUZ, R. T. DE FREITAS, S. R. C. DALAZOANA,

R. Acompanhamento do Datum Altimétrico IMBITUBA através das Redes Altimétrica e Maregráfica do Sistema Geodésico Brasileiro. In: VII Congresso Internacional de Ciências de la Tierra, outubro/2002, Santiago, Chile. **Anais.** Disponível em: <http://www.ibge.com.br/canal_artigos/pdf/2002-Acompanhamento_Imbituba_atraves_Redex_SGB.pdf> Acesso: 04 dezembro 2012.

MICELI, B. S.; DIAS F. de M.; SEABRA, F. M.; ALVES DOS SANTOS P. R.; FERNANDES, M. do C. Avaliação Vertical de Modelos Digitais de Elevação (MDEs) Em Diferentes Configurações Topográficas Para Médias e Pequenas Escalas. **Revista Brasileira de Cartografia.** Nº 63/10, 2011. Disponível em: <http://www.rbc.ufrj.br/_pdf_63_2011/63_01_10.pdf>. Acesso: 04 dezembro 2012.

MOURATIDIS, A. BRIOLE, P. KATSAMBALOS, K. SRTM 3" DEM (versions

Tabela 9: Erros na altitude fornecida por diversos MDEs nos vértices geodésicos e verificação da existência de erros sistemáticos através do cálculo do parâmetro T de STUDENT – Bacia do São Bartolomeu

	DH Interpolação	DH Topodata	DH dem	DH con	DH SRTM	DH ASTER
T358	0,121	-1,809	-5,999	-1,999	-5,999	3,001
T436	-0,161	-5,141	-5,431	-3,431	-6,431	-11,431
1611	0,000	0,470	1,520	3,520	1,520	-0,480
RN4032-J	-0,443	-1,073	-5,383	-2,383	-5,383	-2,383
DF154	0,177	-0,093	-0,773	0,227	-0,773	2,227
V01	0,000	-0,700	-2,540	-1,540	-2,540	-5,540
DF147	0,908	7,158	11,278	18,278	11,278	13,278
DF92	1,746	19,962	19,476	28,476	19,476	21,476
DF89	0,099	4,869	3,039	12,039	3,039	-2,961
DF102	0,076	11,016	30,636	45,636	30,636	2,636
T439	0,632	2,824	18,491	31,491	17,491	7,491
T442	0,958	-2,345	-3,003	8,997	-3,003	4,997
T107	0,685	3,495	0,935	3,935	0,935	3,935
RN2226-N	0,301	0,734	-4,152	4,848	-4,152	-9,152
DF144	0,004	-1,706	-2,686	0,314	-2,686	-1,686
DF146	0,312	8,622	8,152	24,152	8,152	10,152
VT08A2	0,000	-1,005	2,129	14,129	1,129	0,129
91143	-0,010	-0,530	-1,280	-0,280	-1,280	0,720
DF98	0,081	8,061	16,671	23,671	15,671	15,671
T351	-0,014	-0,339	-0,490	0,510	-0,490	5,510
DF94	-1,335	18,865	44,295	58,295	42,295	5,295
T350	-0,279	-0,279	3,571	11,571	3,571	0,571
91142	0,860	4,970	10,380	15,380	10,380	-3,620
DF77	0,179	0,000	-5,143	-3,143	-6,143	1,857
T358	0,204	3,168	5,571	12,196	5,279	2,571
MÉDIA	0,204	3,168	5,571	12,196	5,279	2,571
DESVIO	0,581	6,379	12,596	16,250	12,343	7,470
PADR.	0,338	40,698	158,671	264,052	152,338	55,805
VARIÂNCIA	1,746	19,962	44,295	58,295	42,295	21,476
MÁXIMO	-1,335	-5,141	-5,999	-3,431	-6,431	-11,431
MÍNIMO	0,604	7,003	13,531	20,044	13,185	7,752
RMSE	1,720	2,433	2,166	3,677	2,095	1,686
CÁLCULO T						

1, 2, 3, 4) validation by means of extensive kinematic GPS measurements: a case study from North Greece. **International Journal of Remote Sensing**. Vol. 31, Nº. 23, 10 December 2010, 6205-6222.

ROIG, H. L. et. al. Adequação de uma área situada na APA de São Bartolomeu-DF à legislação ambiental. In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, 2009. **Anais**. p. 6133-6140, 2009. Disponível

em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.17.20.06/doc/6133-6140.pdf>>
Acesso: 04 dezembro 2012.

RODRIGUES, T. L. DEBIASI, P. DE SOUZA, R. F. Avaliação da Adequação dos Produtos ASTER GDEM no Auxílio ao Mapeamento Sistemático Brasileiro. In: III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Recife, 2010. **Anais**. p. 001-005. <http://www.ufpe.br/cgtg/SIMGEOIII/IIISIMGEO_CD/>

[artigos/CartografiaeSIG/Cartografia/A_17.pdf](#)>

Acesso: 04 dezembro 2012.

TERRACAP, **Novo mapeamento 1:10000 do DF**. 2010 Disponível em <<http://www.terracap.df.gov.br/internet/index.php?sccid=344&sccant=45>> e <http://www.sedhab.df.gov.br/mapas_sicad/index_sirgas

[htm](#)>. Acesso: 04 dezembro 2012.

VALERIANO, M. M. & ROSSETTI, D. F. **TOPODATA: Seleção de coeficientes geoestatísticos para o refinamento unificado de dados SRTM**. São José dos Campos: INPE, 2008. 76p.