

COMPARAÇÃO ENTRE DADOS ALTIMÉTRICOS SHUTTLE RADAR TOPOGRAPHY MISSION, CARTAS TOPOGRÁFICAS E GPS: NUMA ÁREA COM RELEVO ESCARPADO

*Comparative Analysis of Elevation Data from Shuttle Radar Topography Mission
and Topographic Map with GPS: a Steep Slope Test Site*

Eduardo da Silva Pinheiro

Universidade de São Paulo – USP

Escola de Engenharia de São Carlos - Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental

Caixa Postal, 292 – CEP 13560-790 São Carlos, SP.

pinheiro_rs@yahoo.com.br

RESUMO

A missão *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) foi realizada no ônibus espacial *Space Shuttle Endeavour* em fevereiro de 2000, com objetivo de obter modelos digitais de elevação (MDE) da Terra. Os dados foram adquiridos com radar de abertura sintética interferométrico (InSAR), nas bandas C (5,6cm – 5,3GHz) e X (3,1cm – 9,6GHz). Este trabalho apresenta uma análise comparativa entre os dados altimétricos derivados da SRTM e de Cartas topográficas (1:50000) da Diretoria do Serviço Geográfico (DSG) com pontos de controle adquiridos com GPS e corrigidos pelo método Diferencial. O estudo foi realizado no Planalto das Araucárias, nordeste do Rio Grande do Sul, Brasil, na área do Centro de Pesquisas e Conservação da Natureza PRÓ-MATA, um local com relevo escarpado e com grandes declividades. As análises dos MDE foram realizadas através de testes estatísticos e gráficos. O MDE SRTM possui um ajuste mais preciso do que o MDE DSG quando comparado com dados obtidos pelo GPS. Os Erros Médios Quadráticos dos MDE SRTM e DSG foram, respectivamente, 7,0m e 26,8m. Os resultados demonstram que o MDE SRTM apresenta boa precisão, no entanto, devido ao tamanho dos seus *pixels* (90x90m) recomenda-se o seu uso em escala 1:250.000.

Palavras chaves: Modelo Digital de Elevação, SRTM, Precisão, DGPS.

ABSTRACT

Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) flown with Space Shuttle Endeavour, which was launched on 11 February 2000, aimed to obtain the Earth digital elevation data (DEM). These data were acquired using Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) in C (5.6cm – 5.3GHz) and X (3.1cm – 9.6GHz) bands. This paper presents a comparative analysis of elevation data from SRTM and Topographic map (1:50.000) with Differential - GPS field data. The study was conducted in *Planalto das Araucárias area*, an elevated site in northeastern of Rio Grande do Sul State, Brazil. The Research and Nature Conservation *Pró-Mata* Center was chosen as an experimental area. Statistical tests and graphs were applied to the quality analysis of DEMs. RMSs of DEMs derived from SRTM and Topographic maps were respectively 7.0m and 26.8m. The results show that SRTM DEM present high accuracy. Nevertheless, considering the size of their pixels (90x90m), it is recommend to use this kind of data to a 1:250.000 scale maps.

Keywords: Digital Elevation Model, SRTM, Accuracy, DGPS.

1. INTRODUÇÃO

As informações derivadas de um modelo digital de elevação (MDE) são extremamente importantes para análises e planejamentos relacionados à modelagem hidrológica, geologia, geomorfologia, ecologia, dentre outras. Um MDE deve representar adequadamente as feições do modelado topográfico, as linhas de cumeeada e os talwegues, caracterizando de

forma mais fiel possível o terreno (MAUNE, 1996; ACKERMANN, 1996).

Para gerar um MDE podem ser utilizados dados topográficos obtidos em levantamentos de campo, técnicas de estereoscopia em fotografias aéreas ou imagens de satélites, ou cartas topográficas (WOLF, 1983; ACKERMANN, 1996). Nos últimos anos, o aprimoramento das técnicas de interferometria por radar gerou resultados positivos na produção de modelos

digitais de elevação, destacando-se a *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) (RABUS, *et al.* 2003).

A *Shuttle Radar Topography Mission* foi lançada a bordo do ônibus espacial *Space Shuttle Endeavour* em fevereiro de 2000, a partir do Centro Espacial de *Kennedy*, EUA. O principal objetivo da SRTM foi obter dados topográficos da Terra. O projeto foi desenvolvido a partir de uma cooperação internacional entre a *National Aeronautic and Space Administration* (NASA), *National Imagery and Mapping Agency* (NIMA), nos Estados Unidos, e agências espaciais da Alemanha e Itália, *German Aerospace Center* (DLR), e *Italian Space Agency* (van ZYL, 2001), respectivamente.

Para adquirir os dados topográficos, a SRTM utilizou um sistema de radar de abertura sintética interferométrico (InSAR). O sistema foi configurado para adquirir duas imagens ao mesmo tempo, através de duas antenas posicionadas separadamente, com distância de 60m entre si (Fig. 1). Os radares empregados na missão tiveram os seguintes comprimentos de onda: banda C (5,6 cm, 5,3 GHz) e banda X (3,1 cm, 9,6 GHz). Cada antena InSAR possui fases diferentes e, por meio da diferença de sinais, foram medidas as elevações (van ZYL, 2001).

O ônibus *Endeavour* sobrevoou a Terra a uma altitude de 233km, com a inclinação de 57°, tendo sido imageado 80% do planeta, compreendendo as latitudes entre 60° Norte e 56° Sul. Durante a missão foram adquiridos 12,3 *Tbyte* de dados para gerar modelos digitais de elevação da Terra. Os MDE gerados pela missão SRTM são distribuídos gratuitamente para o Estados Unidos, com resolução de 30m em coordenadas geográficas, (1 arco segundo, ou 0,000277°) e para o resto mundo com 90m (3 arco segundo ou 0,000833°). O datum e o elipsóide de referência são WGS 84 (*World Geodetic System 1984*), com dados de altitude (*h*) em metros inteiros (HALL *et al.*, 2005).

A missão SRTM teve apoio de campo através de levantamentos geodésicos, realizado com o Sistema de Posicionamento Global (GPS), no modo cinemático. Este método permite determinar rapidamente linhas de posições dadas por um veículo em movimento. Aproximadamente 70.000km de linhas foram coletados para apoio à missão, além de serem distribuídos, no terreno, refletores com coordenadas definidas para adquirir pontos de controle (VALERIANO, 2004).

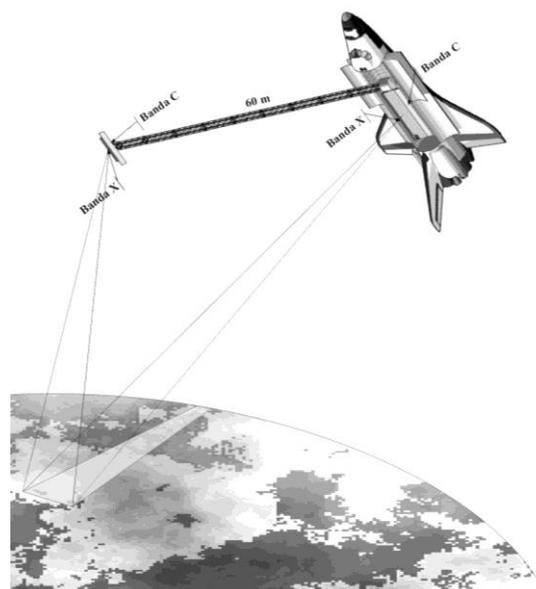


Fig. 1 – Esquema de aquisição de dados pelo ônibus espacial *Endeavour*. Fonte: Adaptada de RADUS, *et al.* (2003).

Os MDE gerados pela missão SRTM, mesmo tendo passado por diversos processamentos, possuem algumas imperfeições como valores extremamente altos e baixos (picos e vórtices), linhas de costa e corpos d'água mal definidos (RABUS *et al.*, 2003). Para VALERIANO (2004), segundo a necessidade e aplicação destinada aos dados SRTM, é recomendável realizar alguns processamentos para corrigir as falhas. Os MDE processados pela NASA podem ser acessados gratuitamente no endereço eletrônico (<http://srtm.usgs.gov/data/obtainingdata.html>). Para maiores informações sobre a missão SRTM consulte van ZYL (2001) e VALERIANO (2004).

Em várias partes do mundo estudos foram realizados como os dados da SRTM. RABUS, *et al.* (2003), SUN *et al.* (2003), RAO (2004), MILIARESIS e PARASCHOU (2005), avaliaram a precisão do modelo digital de elevação gerado pela missão. Já VALERIANO (2004) e HALL, *et al.* (2005) analisaram os dados SRTM identificando algumas falhas e propondo métodos para sua correção. Outros autores pesquisaram a aplicação dos dados SRTM em distintas áreas, tais como cartografia, vegetação (KELLNDORFER *et al.*, 2004; BARROS, *et al.*, 2005; CRUZ, *et al.*, 2005).

Este artigo apresenta uma análise dos dados SRTM aplicados no território brasileiro, para tanto se avaliou uma área teste com relevo altamente acidentado. É importante citar que a necessidade de se obter dados topográficos com precisão, bem como o conhecimento dos erros associados, estimulou a realização do presente estudo. Neste sentido, comparou-se a precisão altimétrica de MDE gerados por dois métodos diferentes, ou seja, dados obtidos em cartas topográficas da Diretoria do Serviço Geográfico (DSG) e dados de radar interferométrico gerados pela missão SRTM.

Pontos adquiridos em campo com uso de aparelhos GPS foram utilizados como verdade para análise dos MDE.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

O estudo foi desenvolvido em uma área teste, localizada a Nordeste do Planalto das Araucárias no Estado do Rio Grande do Sul (RS), entre as coordenadas $\varphi = 29^\circ 26' 17''$ a $\varphi = 29^\circ 34' 42''$ S e $\lambda = 50^\circ 08' 14''$ a $\lambda = 50^\circ 14' 18''$ O de Greenwich (Fig. 2). O Planalto das Araucárias apresenta o relevo suave ondulado, onde se verificam as maiores altitudes do Rio Grande do Sul. Ao Sul e a Leste, este Planalto é bruscamente interrompido por escarpas íngremes, esculpidas por ação dos rios e grandes escorregamentos (VILLWOCK, 1998).

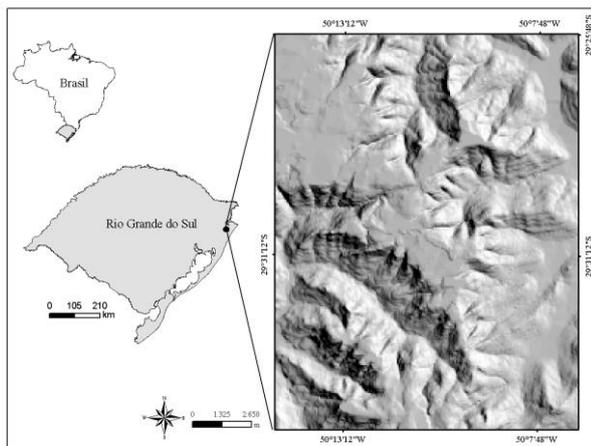


Fig. 2 - Localização da área de estudo.

Cerca de 20% da área de estudo possui declividades entre 30° a 45° , e 38% apresentam declividades entre 15° a 30° . O relevo possui um gradiente de altimetria elevado, com a variação média de 700m entre o planalto e os vales, muitos dos quais formam cânions. As altitudes superiores à 900m são observadas em 23,1% da área. Os fundos dos vales estão em média a uma altitude de 200m (PINHEIRO 2003). Nesta região está localizado o Centro de Pesquisas e Conservação da Natureza Pró-Mata (PRÓ-MATA), criado no ano de 1994, a partir de uma cooperação entre a Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS) e a Universidade alemã de *Tübingen*, com o objetivo de desenvolver projetos e ações para proteger e recuperar ecossistemas da Mata Atlântica.

2.2 Processamento e análise dos dados

A partir das cartas topográficas (DSG) em escala 1:50.000, foram extraídas as curvas de nível com equidistância de 20m, bem como os pontos cotados. Estes dados foram disponibilizados em meio digital por técnicos da Primeira Divisão de Levantamento do Exército Brasileiro (1ªDL). As folhas das cartas topográficas possuíam o *Datum* vertical: Marégrafo de Torres e *Datum* horizontal: Córrego Alegre. No entanto, técnicos da 1ªDL realizaram as transformações destes

Data, para Marégrafo de Imbituba e SAD 69 (*South American Datum of 1969*), respectivamente. As seguintes cartas topográficas foram utilizadas no estudo:

- SH.22 - X - C - II - 3MI - 2954/4 (Tainhas);
- SH.22 - X - C - III - 1MI - 2954/4 (Aratinga);
- SH.22 - X - C - IV - MI - 2954/4 (Barra do Ouro);
- SH.22 - X - C - V - 2 MI - 2972/2 (Maquiné).

Geraram-se três modelos digitais de elevação com os dados das cartas topográficas. O aplicativo utilizado nos processamentos dos dados foi o ERDAS 8.5, no qual foram testados dois métodos de interpolação: o linear e o não-linear. O método de interpolação linear utiliza uma Rede Irregular de Triangulação (*Triangulated Irregular Network - TIN*) e uma equação polinomial de 1º grau para gerar o MDE. O método de interpolação não-linear utiliza, além do TIN, um polinômio de 5º grau, resultando assim em uma superfície mais suavizada (ERDAS, 2000).

O modelo digital de elevação da SRTM analisado possui resolução espacial de 90m (3 segundos de arco ou $0,000833^\circ$). No Laboratório de Geoprocessamento do Centro de Ecologia da UFRGS foram processados e organizados os mosaicos com MDE para todos os Estados brasileiros. Os dados estão disponíveis na rede mundial de computadores (http://www.ecologia.ufrgs.br/labgeo/SRTM_BR.htm). O processamento consistiu na interpolação por superfície de tendência para preencher as falhas existentes nos dados originais e conversão para valores inteiros segundo o método proposto por VALERIANO (2004), além da transformação para o sistema cartográfico brasileiro SAD 69 (Tabela 1). A transformação do sistema de referência WGS 84 para o SAD 69 é realizada por um modelo matemático que utiliza parâmetros de translação das coordenadas cartesianas X, Y e Z, oficiais definidos pelo IBGE (2005).

TABELA 1 – PARÂMETROS CARTOGRÁFICOS UTILIZADOS NO TRABALHO

Projeção	Universal Transversa de Mercator
Datum	South American 1969
Semi-eixo maior (m)	6378160,000
Semi-eixo menor (m)	6356774,719
Achatamento (1/f)	298,25
Soma ao eixo X do WGS 84 (m):	- 66,87
Soma ao eixo Y do WGS 84 (m):	4,37
Soma ao eixo Z do WGS 84 (m):	- 38,52
Longitude de origem	$-51^\circ 00' 00''$
Latitude de origem	$0^\circ 00' 00''$
Origem X (m)	500.000
Origem Y (m)	10.000,000
Fator de escala	0,9996

Fonte: IBGE (2005); LabGeo/Ecologia/UFRGS(2005).

Para avaliar a qualidade dos MDE foram utilizados 52 pontos de controle, adquiridos com GPS e corrigidos pelo método Diferencial (DGPS), com

coordenadas pós-processadas. O levantamento e processamentos destes pontos foram realizados por especialistas da Universidade de *FH. Rottenburg* (Alemanha) no ano de 2000. Um receptor *Trimble 4600 LS GPS* serviu como estação base, estando localizado no terreno da 1ªDL, em Porto Alegre/RS. As coordenadas WGS 84 deste ponto são: $\varphi = 30^{\circ}4'6,670''$ S; $\lambda = 51^{\circ}13'18,473''$ O e a altitude s.n.mar: 87,492 m. Um novo ponto de referência foi estabelecido próximo à sede do PRÓ-MATA, utilizando-se um receptor *Trimble Pathfinder PRO XR*. Numa fase posterior foram adquiridos os 52 pontos na área. Cabe citar que estes mesmos pontos foram utilizados em outro trabalho executado pela 1ª DL, o qual foram ortoretificadas fotografias aéreas em escala 1:10.000.

A análise da qualidade dos MDE (SRTM e DSG) restringiu-se aos valores altimétricos. Com esta finalidade, foram comparados pontos de controle adquiridos com GPS (altitudes ortométricas) e pontos observados nos MDE. Os pontos foram lançados sobre os MDE, localizados através de coordenadas UTM E, N e verificados os valores de *h*. Em seguida utilizaram-se alguns cálculos estatísticos, assim como, geraram-se gráficos do tipo *Box-Plot* para avaliar os valores altimétricos dos MDE. Ainda, calculou-se o Erro Médio Quadrático (EMQ) usando a seguinte fórmula:

$$EMQ = \sqrt{\frac{\sum (h - h')^2}{n}} \quad (1)$$

onde *h* é a altitude medida com GPS; *h'* é a altitude interpolada no MDE e *n* é número de pontos utilizados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O novo ponto de referência estabelecido durante o levantamento com uso de GPS está localizado próximo da sede do PRÓ-MATA, com as seguintes coordenadas: WGS 84 $\varphi = 29^{\circ} 28' 48,827''$ S e $\lambda = 50^{\circ} 10' 21,379''$ O, altitude s.n.mar 903,814m. Os 52 pontos de controle adquiridos na área, com coordenadas geográficas e *Datum* WGS 84, foram processados e convertidos para o sistema de referência geodésico SAD 69. Na Tabela 1 são apresentados os parâmetros de transformação dos dados. Os pontos de controle foram distribuídos na área do PRÓ-MATA e no seu entorno, conforme a Fig. 3. A análise estatística dos pontos adquiridos está apresentada na Tabela 2.

TABELA 2 – ANÁLISE DO ERRO MÉDIO QUADRADO DOS PONTOS GPS

Estatística	Valor (m)
Média	1,48
Erro padrão	0,28
Desvio padrão	2,02
Mínimo	0,07
Máximo	10,29

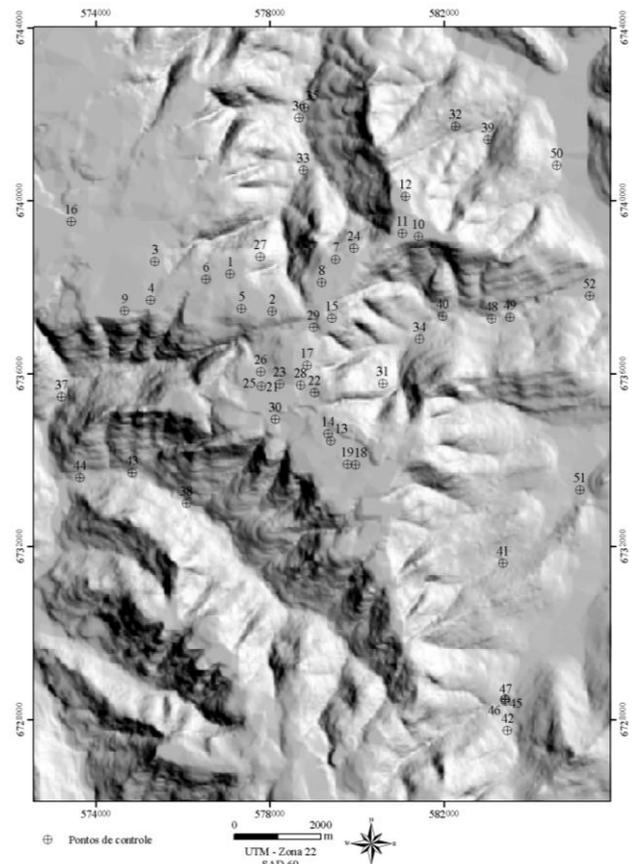


Fig. 3 – Distribuição dos pontos de controle (DGPS) para análise dos MDE.

Uma questão que pode ser adicionada aos erros identificados em um modelo digital de elevação é o tamanho do *pixel* utilizado em sua geração. No processo de identificação de um ponto com coordenadas E, N, h, mesmo procurando ser o mais preciso possível, podem ocorrer erros de localização deste ponto. Por exemplo, em uma área com alto grau de declividade podem ocorrer erros em localizar um *pixel* com um valor de cota identificado-se o *pixel* vizinho. Para minimizar este tipo de erro, a partir das cartas topográficas, geraram-se MDE com *pixels* de 10x10m e 5x5m (Tabela 3), além de serem utilizados métodos de interpolação distintos, conforme abordado no item 2.2, e verificaram-se suas respectivas diferenças.

TABELA 3 – MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO GERADOS A PARTIR DAS CARTAS TOPOGRÁFICAS

Tipos de MDE	Equidistâncias das curvas de nível	Método		Tamanho do pixel
		Linear	Não Linear	
DSG 10L	20m	X		10x10 m
DSG 10NL	20m		X	10x10 m
DSG 5L	20m	X		5x5 m

Na Fig. 4 é apresentado um gráfico *Box-Plot* que compara os diferentes MDE criados a partir das cartas topográficas (DSG). Observa-se que não há diferença significativa entre eles. Na Tabela 4 são apresentadas as estatísticas dos MDE, por meio das quais pode-se verificar que os valores da média, desvio padrão, erro padrão e coeficiente de variação são muito próximos. Da mesma forma, por meio da Análise de Variância (ANOVA) com nível de significância de 0,05, observa-se que não há diferença significativa entre os MDE gerados a partir das cartas topográficas, pois $p = 0,9999$ (Tabela 4).

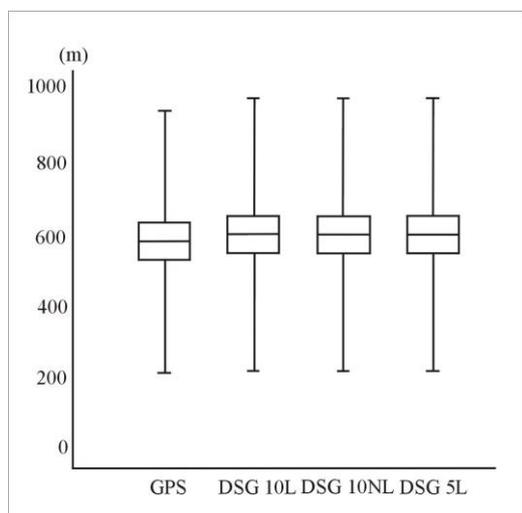


Fig. 4 - Análise das diferenças entre os MDE gerados a partir das cartas topográficas.

Não obstante, em uma análise mais detalhada da Tabela 5, constata-se que o modelo digital de elevação DSG 10L apresenta os menores valores de Desvio padrão, Erro padrão e Coeficiente de variação. Outro fato importante é que este MDE foi gerado com um interpolador que utiliza além do TIN um polinômio de 1° grau, o qual pode deixar os dados mais próximos da realidade do terreno (ERDAS, 2000). Neste sentido, as análises comparativas foram realizadas entre os modelos digitais de elevação DSG 10L e SRTM (Fig. 5).

Após definir quais seriam os MDE avaliados, foi gerado um gráfico da diferença entre os pontos adquiridos com GPS e aqueles observados nos MDE (DSG e SRTM) (Fig.6).

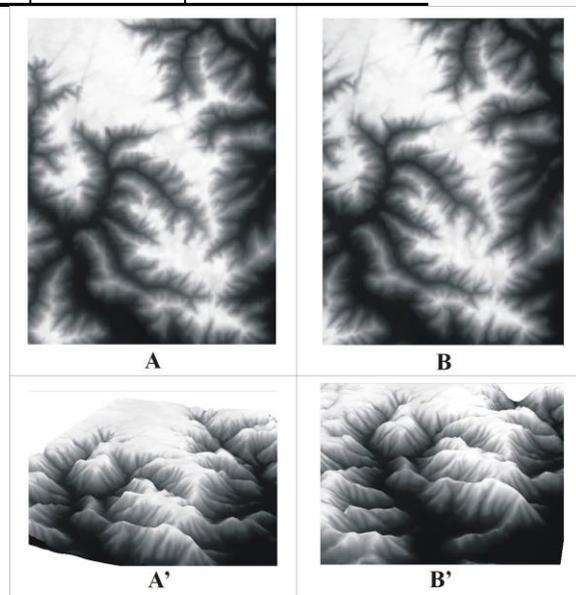


Fig. 5 - A = MDE SRTM; A' = visão em 3D do MDE SRTM. B = MDE DSG; B' = visão em 3D do MDE DSG. Exagero vertical nos dados 3D de 4x.

Na Fig. 6, os valores mais próximos de 0 (zero) apresentam uma diferença menor entre o ponto no terreno (GPS) e o MDE, isto é, são os valores altimétricos mais precisos. O MDE gerado pela missão SRTM possui diferença média de -5,2m e máxima de -17,4m. Já nos MDE criados a partir das cartas topográficas, identifica-se a diferença média de -18,4m e a máxima de -49,8m. No gráfico da Fig. 5, é possível inferir que há duas paisagens marcadas: o planalto, representado pelos pontos de 1 até 30, e os vales pelos pontos de 31 a 52 (Fig.3). Diante desta verificação, ou seja, uma discrepância entre os pontos medidos no planalto e nos vales, optou-se por realizar análises distintas para as duas paisagens.

Na Fig. 7 é apresentado um gráfico *Box-Plot* que compara a diferença entre os pontos medidos pelo GPS e os pontos observados nos MDE (SRTM e DSG) na área do planalto. O gráfico comprova que o MDE DSG 10L superestima as altitudes do relevo e identifica-se também a presença de um ponto com valor extremo (*outlier*). A análise deste *outlier* possibilitou observar que enquanto os outros pontos do MDE DSG 10L superestimam as altitudes, este *outlier* mais se aproxima da realidade do terreno.

TABELA 4 - ANOVA DOS MDE GERADOS A PARTIR DAS CARTAS TOPOGRÁFICAS

Fonte da variação	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>QM</i>	<i>F</i>	<i>p-valor</i>	<i>F crítico</i>
MDE	1,53	2	0,76	$5,236 \times 10^{-6}$	0,99999	3,06
Resíduos	22352910	153	146097,45			
Total	22352911	155				

Onde: *SQ*: Soma de quadrados; *gl*: Graus de liberdade; *QM*: Quadrados médios; *F*: Teste de Fisher; *p-valor*: probabilidade; *F crítico*: F tabelado.

TABELA 5 - ESTATÍSTICA DOS MDE GERADOS A PARTIR DAS CARTAS TOPOGRÁFICAS

	<i>N</i>	<i>Média (m)</i>	<i>Mínimo (m)</i>	<i>Máximo (m)</i>	<i>Desvio Padrão (m)</i>	<i>Erro Padrão (m)</i>	<i>Coefficiente de variação (%)</i>
DSG 10L	52	607,0	60,0	960,5	381,8	52,95	62,9
DSG 10NL	52	606,7	60,9	963,0	382,5	53,04	63,04
DSG 5L	52	606,8	61,0	963,0	382,4	53,02	63,02

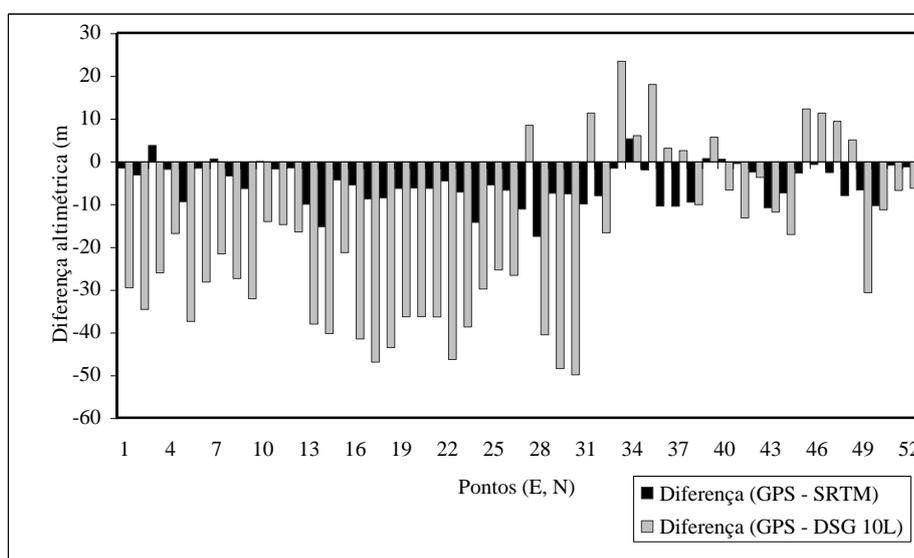


Fig. 6 – Diferença entre as cotas *h* medidas a partir do GPS, SRTM e DSG 10L.

As altitudes medidas com o MDE SRTM também são superestimadas. Entretanto, as discrepâncias são menores quando comparadas com os valores apresentados pelo MDE DSG 10L (Fig. 7). A Tabela 6 apresenta uma análise estatística entre os MDE e o GPS, observa-se que os valores de altitude do MDE SRTM estão mais próximos dos valores medidos no terreno.

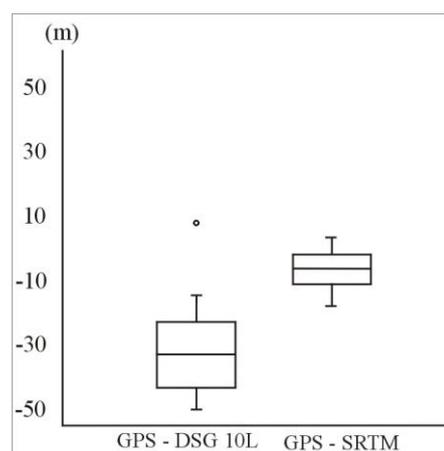


Fig. 7 - Gráfico *Box-Plot* da diferença entre GPS e os MDE na área de planalto.

TABELA 6 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DA DIFERENÇA ENTRE GPS E MDE, NO PLANALTO

Estatística	GPS - DSG10L(m)	GPS - SRTM(m)
Diferença mínima	2,6	0,1
Diferença máxima	-49,8	-17,4
Média	-31,2	-6,0
Erro Padrão	2,4	0,9
Mediana	-34,5	-6,2
Desvio padrão	12,9	4,7

Para os pontos alocados nos vales, as diferenças altimétricas entre o GPS e os MDE são menores, quando comparadas com as verificadas no planalto. Pela análise da Fig. 8 verifica-se mais uma vez que o MDE DSG 10L apresenta discrepâncias maiores em relação ao GPS, enquanto as altitudes do MDE SRTM aproximam-se mais dos dados de GPS. Na Tabela 7 são demonstradas as estatísticas comparativas nos vales, verificando-se que os dados do SRTM possuem um ajuste mais preciso, quando comparado com dados obtidos pelo GPS.

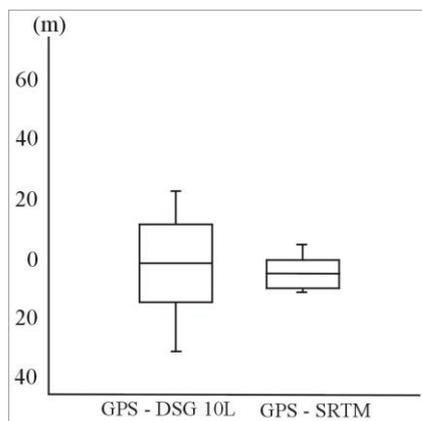


Fig. 8 – Gráfico Box-Plot da diferença entre GPS e os MDE na área de vale.

TABELA 7 – ANÁLISE ESTATÍSTICA DA DIFERENÇA ENTRE GPS E MDE, NOS VALES

Estatística	GPS - DSG 10L(m)	GPS - SRTM(m)
Diferença mínima	3,2	-0,6
Diferença máxima	-30,6	-10,7
Média	-1,7	-4,2
Erro Padrão	2,9	1,0
Mediana	-3,6	-2,5
Desvio padrão	13,2	4,7

O cálculo do Erro Médio Quadrático para toda a área estudada, assim como para cada paisagem separada (planalto e vales) demonstrou que os menores erros são apresentados pelo MDE SRTM, enquanto o MDE DSG 10L possui erros elevados (Fig. 9), independentemente da paisagem analisada.

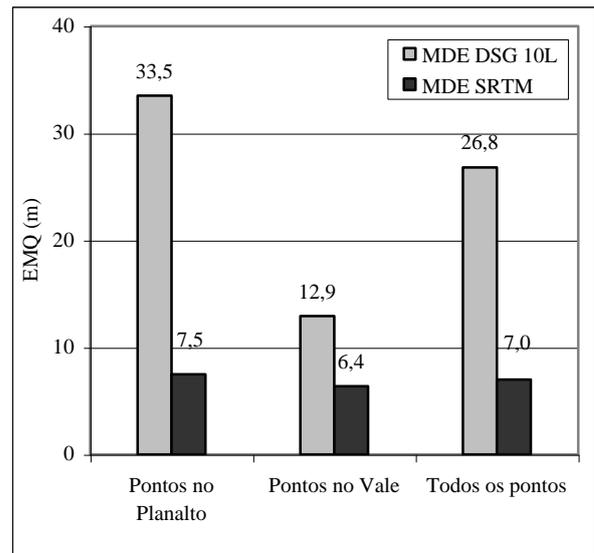


Fig. 9 - Comparação entre o Erro Médio Quadrático calculado em distintas formas de relevo.

De acordo com as especificações da missão SRTM, os modelos digitais de elevação foram produzidos com uma precisão vertical de 16m, com 90% de certeza (van ZYL, 2001; RABUS, *et al*, 2003). MILIARESIS e PARASCHOU (2005) realizaram um estudo com dados SRTM, na ilha de Creta, ao sul da Grécia, tendo encontrado o EMQ de 25,5m. O erro calculado pelos autores foi maior que o especificado pela missão SRTM e maior que o encontrado no presente estudo, de 7m. Já RAO (2004) comparou dados altimétricos adquiridos com GPS e SRTM na Índia, chegando a uma precisão de 5m. SUN *et al.* (2003) avaliaram os dados SRTM na Sibéria Central e em suas análises o EMQ foi de 5,17m. Como pode ser observado na Fig. 09, no presente estudo, o EMQ do modelo digital de elevação gerado pela SRTM manteve-se praticamente constante, tanto em áreas do planalto como nos vales. Neste sentido, o MDE SRTM demonstra possuir maior confiabilidade, pois os erros estão distribuídos e são independentes da forma de relevo.

4. CONCLUSÕES

A disponibilidade de modelos digitais de elevação SRTM para o Brasil pode representar um passo importante para mapear locais com difícil acesso e/ou com deficiência cartográfica, além de auxiliar em planejamentos e estudos ambientais. A gratuidade dos MDE SRTM pode facilitar o acesso a informações como, por exemplo, para projetos com orçamentos restritos, pequenas prefeituras, universidades, entre outros. Para estes objetivos serem atingidos são necessários alguns processamentos nos dados SRTM brutos, com intuito de corrigir picos e vórtices, sombra no sinal de radar e imperfeições não desejadas.

As análises realizadas neste estudo demonstraram que as altitudes medidas pelo MDE SRTM, após as devidas correções, apresentaram resultados melhores quando comparados com os MDE

das cartas topográficas. É importante lembrar que os dados extraídos de cartas topográficas (DSG) 1/50.000 foram gerados a partir de levantamentos fotogramétricos de 1975, quando técnicas mais antigas que as atuais eram empregadas na confecção de mapas. As técnicas de radar interferométrico, apoiadas em levantamentos com uso de DGPS, utilizadas na missão SRTM, representam uma das mais avançadas tecnologias para geração de bases topográficas digitais. Conforme verificado no estudo, os Erros Médios Quadráticos dos MDE DSG e SRTM foram, respectivamente, 26,8m e 7,0m.

O MDE SRTM analisado, com resolução espacial de 90x90m, apresentou erros baixos, com resultados satisfatórios. Cabe citar que, com esta resolução espacial, o uso do MDE SRTM é mais adequado em escala de 1: 250.000 ou menores. O estudo foi realizado no Sul do Brasil, local onde existiam dados passíveis de comparação. No entanto, é importante citar que estes dados poderiam ser utilizados, por exemplo, para mapear áreas da Amazônia Legal (1:250.000).

Destaca-se que o conhecimento do grau de precisão dos MDE gerados é extremamente importante, pois auxilia na tomada de decisão sobre qual o melhor dado a ser utilizado conforme a escala de trabalho definida.

Finalmente, espera-se que haja maiores investimentos para a cartografia nacional. Neste estudo mais do que demonstrar a precisão dos dados SRTM, com algumas restrições evidencia-se a necessidade da atualização das bases cartográficas nacionais.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Rainer Wagelaar da Universidade de *FH. Rottenburg* e a 1ª. Divisão de Levantamento do Exército (1ª. DL/DSG) por disponibilizarem os dados utilizados neste estudo. Ao Prof. Dr. Jorge A. Villwock da PUCRS que apoiou com entusiasmo o trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACKERMANN, F. Techniques and strategies for DEM generation. In: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS). **Digital photogrammetry an addendum to the manual of photogrammetry**. Ed. Cliff Greve, Chapter 6 pp 135 – 149, 1996.

BARROS, R. S. DE; CRUZ, C. B. M.; REIS, R. B. COSTA JUNIOR, N. DE A. Avaliação do modelo digital de elevação do SRTM na ortorretificação de imagens Landsat 7 – área de aplicação: Angra dos Reis – RJ. In: **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto 12. Anais**. Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE, p. 3997-4004.

CRUZ, C.B.M.; BARROS, R.S.; REIS, R.B. Ortorretificação de imagens CBERS-2 usando DEM do

SRTM – área de aplicação: Angra dos Reis- RJ. In: **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto 12. Anais**. Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE, p. 899-906.

ERDAS. **Erdas Image Tour Guides**. Atlanta Georgia 2001, 662 p.

HALL, O.; FALORNI, G.; BRAS, R. L. Characterization and quantification of data voids in the shuttle radar topography mission data. **IEEE Geoscience and Remote Sensing letters**, v.2, n.2, 2005.

IBGE. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Resolução nº 23 de 21/02/1989**. Disponível em:

<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/default_normas.shtm?c=14> Acesso em: 10 out. 2005.

KELLNDORFER, J.; WALKER, W.; PIERCE, L.; DOBSON, C.; FITES, J.A.; HUNSAKER, C.; VONA, J.; CLUTTER, M. Vegetation height estimation from shuttle radar topography mission and national elevation datasets. **Remote Sensing of Environment**. 93 pp. 339 – 358. 2004.

LABGEO-ECOLOGIA-UFRGS. **Modelos digitais de elevação dos estados brasileiros, obtidos a partir do SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)**. Disponível em: <http://www.ecologia.ufrgs.br/labgeo/SRTM_BR.php> Acesso em: 16 mar. 2006.

MAUNE, D. F. Introduction to digital elevation models (DEM). In: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS) **Digital photogrammetry an addendum to the manual of photogrammetry**. Ed. Cliff Greve, Chapter 6 pp 131 – 141, 1996.

MILIARESIS, G. Ch.; PARASCHOU; C.V.E. Vertical accuracy of the SRTM DTED level 1 of Crete. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**. 7. pp. 49–59. 2005.

PINHEIRO, E. S. Avaliação de imagens *QuickBird* na análise geográfica de um setor da Mata Atlântica do Rio Grande do Sul. 173p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto), São José dos Campos: INPE-10094-TD/891. Disponível em: www.iris.sid.inpe.br:1913. 2003.

RABUS, B.; EINEDER, M.; ROTH, A.; BAMLER, R. The shuttle radar topography mission - a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. **Journal Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS)**. 53 – pp. 241 – 262. 2003.

RAO, K. S. (2004). Validation of digital elevation model derived from Shuttle Radar Topography Mission

using GPS field measurements. Disponível em:
<www.gisdevelopment.net/tecnology/gps/ma03033abs.htm.> Acessado em: 28/03/2005.

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**. 88. 401–411. 2003.

VALERIANO, M.M. Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul. São José dos Campos, INPE, 72p. (INPE-10550-RPQ/756). Disponível em:
<<http://iris.sid.inpe.br:1912/col/sid.inpe.br/sergio/2004/06.30.10.57/doc/publicacao.pdf>>. 2004.

van ZYL, J.J. The shuttle radar topography mission (SRTM): a breakthrough in remote sensing of topography. **Acta Astronautica**. v. 48 n° 5 – 12. pp. 559-564. 2001.

VILLWOCK, J. A. São Francisco de Paula e o Planalto das Araucárias: Um ponto de vista geológico. In: Richter, M. (org.) **Conservação da biodiversidade e desenvolvimento sustentável de São Francisco de Paula – Um plano de ação preliminar**. EDIPUCRS, Porto Alegre, pp. 53 – 64, 1998.

WOLF, P.R. **Elements of photogrammetry, with air photo interpretation and remote sensing**. Second Edition. New York, McGraw-Hill Book Company, 1983, 628 p.

Recebido: 10/06/2005 Aceito para publicação:
30/04/2006