

Avaliação do Modelo Digital do Terreno Extraído de Dados do SRTM – Uma Abordagem Baseada na Declividade, Aspecto e Uso/Cobertura do Solo

Orlando Demetrio Zaloti Junior^{1,2}
Corina da Costa Freitas¹
Sidnei João Siqueira Sant'Anna¹
Raquel Avancini Manhães de Andrade³

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
{corina,sidnei}@dpi.inpe.br

²Instituto de Estudos Avançados - IEAv
Caixa Postal 6044 - 12228-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
zaloti@ieav.cta.br

³Prefeitura Municipal de São José dos Campos
12209-530 - São José dos Campos - SP, Brasil
pesquisa2@sjc.sp.gov.br

Abstract. This paper evaluates the accuracy of Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) digital elevation model (DEM) based on a method that considers some parameters which can affect the quality of the interferometric DEM (slope, aspect and land use/land cover). The benchmarks used in this work were a set of GPS points surveyed with static relative positioning. It was also employed a DEM extracted from several topographic maps at scale of 1:10.000 in order to obtain the slope and aspect of the study area. The land use/land cover was classified from an ETM+/Landsat-7 imagery. It can be concluded after statistical analysis that SRTM DEM is affected by slope and aspect. The SRTM DEM also overestimates the elevation on this experiment.

Palavras-chave: SRTM, modelo digital do terreno, interferometria, radar.

1. Introdução

De acordo com Pike (2002) a modelagem do terreno pode ser definida como uma técnica de quantificação da superfície física. O modelo digital do terreno (MDT) é atualmente um dos mais importantes dados usados para a análise geográfica, sendo uma representação computacional discreta de uma superfície contínua (Sant'Anna e Freitas, 2005). A criação de um MDT é o resultado de aquisição e interpolação de uma amostra de pontos para representar o terreno.

Um dos métodos de se extrair o MDT de imagens de radar de abertura sintética (*Syntetic Aperture Radar* – SAR) é a interferometria. É um procedimento rápido, preciso e automatizado de se obter as informações altimétricas. Conforme Henderson e Lewis (1998) esta técnica é também empregada em detecção de objetos móveis, monitoramento de deformações no terreno provocadas por atividades tectônicas, caracterização de estrutura de dossel, etc.

A técnica interferométrica está sujeita a um grande número de fatores físicos que podem contribuir para a qualidade final do produto obtido. Os fatores que podem afetar o processamento interferométrico estão associados às características do sistema, do alvo e do processamento. Os fatores relacionados ao sistema estão associados ao vetor de estado, ao ruído de receptor do radar, a decorrelação temporal e espacial. Quanto ao processamento, se refere às características do algoritmo utilizado no processamento, à qualidade do co-registro e

ao desdobramento da fase (influenciada pelas distorções em imagens radar). A declividade do terreno, o aspecto, o tipo de cobertura e uso do solo são alguns dos fatores associados ao alvo que podem afetar a qualidade do MDT interferométrico.

A declividade é caracterizada pela máxima inclinação (ângulo vertical) de um plano tangente a um ponto na superfície do terreno, em relação ao horizonte. Pode ser medido em graus ou porcentagem. O aspecto é o azimute (ângulo horizontal) da projeção da direção determinada pela declividade; corresponde a uma linha perpendicular às curvas de nível, medido em graus (Evans, 1972).

Neste contexto, o propósito deste trabalho é avaliar a exatidão obtida com o MDT SRTM gerado a partir de dados interferométricos com a banda C, em relação à declividade, ao aspecto, ao uso/cobertura do solo. Como referência, foram empregados pontos GPS com alta precisão.

1.1 Algumas análises aplicadas na avaliação de MDTs interferométricos

Madsen et al. (1993) avaliaram MDTs obtidos a partir de dados do SAR aerotransportado NASA DC-8 com a banda C, considerando dois tipos de terrenos: plano e montanhoso. Foram detectados erros médios quadráticos de 2,2 e 5,0 m para áreas planas e montanhosas respectivamente. Segundo os pesquisadores, a influência da vegetação foi considerada desprezível em relação às medições de altitudes, por serem compostas por arbustos de aproximadamente meio metro de altura.

Diferentes acurácias obtidas para vários tipos de cobertura e uso do solo com dados do ERS-1 (banda C) foram identificadas por Wu et al. (1996). Diferentes coberturas de solo possuem diferentes propriedades e reflectividade, o que resulta em diferentes performances de coerência. Valores crescentes de coerência e acurácia foram encontrados respectivamente para floresta, área urbana, área rural e *corner reflector*. Small e Nüesch (1996) e Gelautz et al. (2003) também identificaram valores baixos de coerência para florestas, principalmente aquelas localizadas em regiões montanhosas, para a banda C.

Hodgson et al. (2003) realizaram uma comparação dos MDTs, extraídos de dados obtidos de um SAR na banda X e de um LIDAR (*Light Detection and Ranging*) aerotransportados. Em uma área com gradiente de declividade variando de 0 a 14%, foram analisados os relacionamentos entre os erros de elevação, gradientes de declividade e cobertura do solo (grama baixa e alta, pinheiro, vegetação decídua e arbustiva). Os resultados obtidos para o SAR, indicam uma forte relação entre a acurácia da elevação e o tipo de cobertura de solo e, em menor grau, relacionada à declividade.

Ludwig e Schneider (2006) avaliaram o MDT extraído do SRTM na banda X, sendo empregados pontos de controle, perfilagem e subtração de imagens na avaliação. O MDT SRTM foi analisado quanto ao aspecto, declividade, ângulo de incidência local e uso do solo (áreas urbanas, agricultura, floresta, vegetação arbustiva, áreas abertas, brejos e corpos d'água). O estudo concluiu que: o MDT SRTM superestima a altitude em relevos movimentados e subestima em relevos planos; o erro aumenta com a declividade; o aspecto apresenta erros menores em sudeste e maiores em noroeste. Não foi encontrada uma relação significativa entre uso do solo e a acurácia do MDT SRTM, apesar de não terem sido realizados testes estatísticos que validassem esta afirmação.

Toutin (2002) também realizou uma análise do impacto da declividade e do aspecto na acurácia de MDTs radargramétricos, com o Radarsat-1 (banda C). A partir de MDTs de referência, foram extraídos os modelos de declividade e de aspecto. Os estratos de aspecto utilizadas foram: *foreslope* (compreendendo a região mais iluminada pelo radar), *backslope* (a região não iluminada pelo radar), azimute (a região no sentido de deslocamento do satélite) e azimute reverso (a região oposta à região azimute). A acurácia do MDT teve alta correlação

com o gradiente de declividade. Para o aspecto, o melhor e o pior resultado ocorreram para o *foreslope* e *backslope*, respectivamente.

1.2 Shuttle Radar Topography Mission – SRTM

A missão SRTM foi dirigida pela *National Aeronautics and Space Administration* – NASA, com o propósito de gerar um MDT de alta qualidade entre as latitudes de 60°N e 57°S, cobrindo aproximadamente 80% da superfície terrestre. Foi utilizado um sistema SAR operando no modo interferométrico com as bandas C e X. Os dados disponíveis para a América do Sul foram obtidos com a banda C.

Os MDTs são distribuídos gratuitamente na internet, com uma resolução de aproximadamente 90 m (3 arcos de segundo). Dados com melhor resolução (aproximadamente 30 m ou 1 arco de segundo) são de uso exclusivo de instituições autorizadas pelo Governo Norte-Americano.

O MDT interferométrico foi especificado a atender uma exatidão absoluta de ± 16 m em 90% dos dados (Rabus et al., 2003). Um levantamento de campo oficialmente realizado pela NASA para se obter uma avaliação do MDT SRTM, aponta para um erro absoluto de 6,2 m em 90% dos dados para a América do Sul (Rodriguez et al., 2005).

2. Área-teste

A área de interesse esta inserida no município de São José dos Campos, Estado de São Paulo. O relevo é formado pelos morros da Serra do Mar (sul do Município), a transição dos morros cristalinos desta Serra, até as colinas tabuliformes (terraços fluviais) e destas até a Várzea do Rio Paraíba do Sul e, novamente a passagem por colinas e morros até encontrar as escarpas (norte do Município) da Serra da Mantiqueira (Morelli et al., 2003). A altitude no Município varia entre 550 e 2082 m.

3. Materiais

Foi avaliado o MDT SRTM obtido com a banda C com resolução de 90 m (3 arcos de segundo), cobrindo a área-teste. Os dados SRTM foram levantados entre 11 e 22 de fevereiro de 2000. O MDT SRTM foi obtido do sítio <<http://srtm.usgs.gov/index.html>> do *United States Geological Service* (USGS) em janeiro de 2005.

Para a extração das classes de uso e cobertura do solo foram utilizadas as imagens (órbita-ponto 219/76) das bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7 do sensor ETM+/Landsat-7, com resolução espacial de 30 m. Estas imagens foram coletadas em 09 de janeiro de 2000.

As imagens do ETM+ foram ortoretificadas com um MDT de referência extraído de cartas do Instituto Geográfico e Cartográfico (IGC), na escala de 1:10.000 (equidistância das curvas de nível de 5 m) da região. O MDT foi cedido pela Prefeitura Municipal de São José dos Campos. Este MDT, com amostragem de 5 m, também foi utilizado na obtenção dos estratos de declividade e de aspecto.

Foram utilizados 104 pontos GPS levantados pelo IEAv, Universidade Estadual Paulista (UNESP), INPE, e pela Fundação de Ciência, Aplicações e Tecnologia Espaciais (FUNCATE) com receptores geodésicos (Ashtec Z12, Sokkia Stratus e Trimble 4600LS) empregando o posicionamento relativo estático. Este método permite atingir precisões centimétricas nas coordenadas levantadas. Os pontos foram levantados entre 2003 e 2004. A localização destes pontos é apresentada na **Figura 1**. Foi adotada como referência a estação planimétrica SAT 91537 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

4. Método

O MDT SRTM fornecido pela USGS possui algumas falhas ou vãos (Valeriano, 2004), os quais foram preenchidos através de interpolação. Posteriormente, foi criado um mosaico com os dados corrigidos. Este mosaico foi transformado para a projeção UTM (zona 23 sul, datum WGS-84).

Os dados GPS foram processados e ajustados, sendo as coordenadas exportadas na mesma projeção e datum do MDT SRTM. Foi adotada a altitude elipsoidal referenciada ao WGS-84 por ser este o sistema de referência do GPS (não sofrendo degradação de precisão no processo de transformação para a altitude ortométrica) e do MDT SRTM fornecido pelo USGS.

As imagens ETM+/Landsat-7 foram ortorretificadas a fim de se corrigir distorções devido ao deslocamento do relevo na imagem. Obteve-se um erro médio quadrático inferior a um pixel (0,96), sendo utilizados 3 coeficientes polinomiais e 46 pontos espalhados por toda a imagem.

Foi então realizada uma classificação supervisionada com o método de máxima verossimilhança (MAXVER) para as classes área urbana, cultura, pastagem, floresta, solo exposto, água e nuvem. As classes pastagem e cultura foram agrupadas no intuito de se conseguir uma quantidade mínima de pontos para a avaliação estatística. Após a classificação, a imagem gerada foi editada vetorialmente, constituindo, ao final, um estrato de uso e cobertura do solo (contendo as classes área urbana, cultura-pastagem e solo exposto).

Do MDT de referência foram extraídos os estratos de declividade e de aspecto. Foram adotadas para este trabalho as classes de declividade, baseadas naquelas adotadas por De Biase (1993): plano (0-6%), ondulado (6-20%) e montanhoso (>20%). O aspecto foi dividido em norte, sul, este, oeste e sem aspecto (quando a declividade é plana).

Com os estratos de uso/cobertura do solo, declividade e aspecto foi aplicada uma operação de intersecção espacial, isto é, um cruzamento dos estratos, obtendo-se um mapa de cruzamentos. Os mapas de declividade, aspecto, uso/cobertura do solo e cruzamentos podem ser visualizados na **Figura 1**.

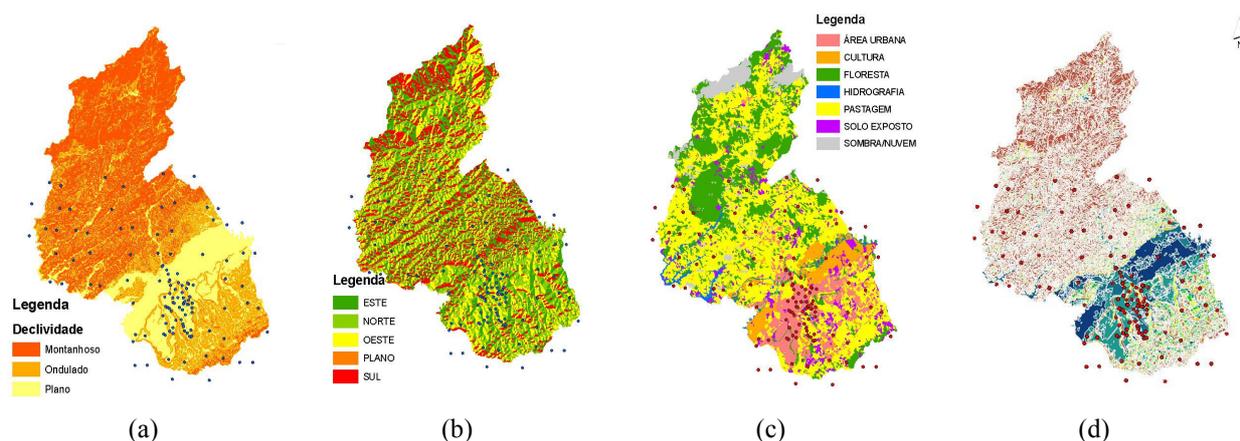


Figura 1 – Mapas de estratos com pontos GPS: declividade (a), aspecto (b), uso/cobertura do solo (c) e cruzamentos (d).

Para o mapa de cruzamentos foi aplicado um filtro morfológico de erosão. As regiões limítrofes entre os estratos citados, geralmente não são bem definidas. Desta forma, uma erosão morfológica foi aplicada a este mapa de estrato a fim de minimizar possíveis erros de classificação oriundos destas regiões.

Assim foram eliminados os pontos GPS que estavam nas regiões erodidas e sob nuvens, resultando em pontos aptos a participarem da avaliação proposta para este trabalho, conforme pode ser observado na **Tabela 1**.

A fim de se avaliar estatisticamente a acurácia do MDT SRTM, foram calculadas para cada estrato, as diferenças entre as altitudes do MDT SRTM e as altitudes GPS. Destas diferenças, foram calculados o erro médio, o desvio-padrão e o erro médio absoluto. A seguir, foram realizados testes de hipóteses para se determinar se os pares de estratos analisados possuíam variâncias (teste F) e médias semelhantes (teste *t*). O teste *t* permite verificar se os erros médios entre dois estratos são estatisticamente semelhantes.

Foram também utilizados testes de hipóteses para se verificar se os erros médios para cada estrato eram iguais a zero. Isto permite constatar, por exemplo, se está ocorrendo uma superestimação dos resultados (se o intervalo de confiança possuir apenas valores positivos).

Finalmente foi realizada uma regressão linear simples para cada estrato, sendo observados os intervalos de confiança para o intercepto (β_0) e a inclinação da reta de regressão (β_1), que indicam o relacionamento entre as altitudes.

5. Resultados

Alguns resultados encontrados das análises estatísticas são apresentados na **Tabela 1**. O maior valor de desvio-padrão calculado foi de 6,18 m para o estrato declividade ondulada. Conforme Rabus et al. (2003) a precisão estimada a priori pela NASA para o MDT SRTM é de 16 m em 90% dos dados. Se considerarmos uma distribuição gaussiana para os erros, pode-se afirmar que 90% dos erros analisados para este estrato será menor que $1,445 \times 6,18 = 10,16$ m. Portanto, os resultados encontrados estão dentro da estimativa original, porém acima do valor encontrado por Rodriguez et al. (1995) para a América do Sul.

Tabela 1 – Estatísticas e intervalos de confiança para a média dos erros.

ESTRATO	Nº DE PONTOS	ERRO MÉDIO (m)	DESVIO-PADRÃO (m)	ERRO MÉDIO ABSOLUTO (m)	INTERVALO DE CONFIANÇA DE 95%
DECLIVIDADE PLANA	37	5,36	2,88	5,49	$4,40 < \mu < 6,32$
DECLIVIDADE ONDULADA	7	9,95	6,18	9,95	$4,23 < \mu < 15,66$
ASPECTO ESTE	5	12,99	4,07	12,99	$7,94 < \mu < 18,05$
CLASSE CULTURA/PASTAGEM	9	4,80	5,62	4,88	$0,48 < \mu < 9,12$
CLASSE CULTURA/PASTAGEM (SEM HV69)	8	3,07	2,27	3,16	$1,21 < \mu < 4,92$
CLASSE ÁREA URBANA	35	6,42	3,34	6,54	$5,27 < \mu < 7,57$
ESTRATO PLANO/ (SEM ASPECTO)/ CULTURA-PASTAGEM	8	3,07	2,27	3,16	$1,17 < \mu < 4,96$
ESTRATO PLANO/ (SEM ASPECTO)/ ÁREA URBANA	29	5,99	2,73	6,13	$4,95 < \mu < 7,03$
ESTRATO ONDULADO/ESTE/ ÁREA URBANA	4	11,57	2,94	11,57	$6,89 < \mu < 16,25$

A **Tabela 1** apresenta os resultados dos testes usados para verificar se os intervalos de confiança dos erros médios contem o valor zero (com um nível de confiança de 95%). Nenhum dos intervalos contem o valor nulo, sendo todos formados por valores positivos. Um dos fatores que pode ter contribuído para este resultado foi o emprego da banda C, que tem uma penetração do sinal da ordem de seu comprimento de onda (aproximadamente 5 cm), conforme Henderson e Lewis (1998). Este resultado mostra que o MDT SRTM superestima as altitudes na região da área de estudo, com os pontos e estratos utilizados.

Pelo teste *t*, as declividades plana e ondulada apresentaram erros médios diferentes a um nível de significância de 5% (**Tabela 2**). Isto significa que as altitudes do MDT SRTM apresentam um comportamento diferente para cada uma destas declividades. A declividade ondulada também apresenta valores maiores de erro médio, desvio-padrão e erro médio quadrático (**Tabela 1**) em relação à declividade plana.

Estes resultados eram esperados para o MDT SRTM. Superfícies mais onduladas são mais sujeitas a erros causados em planimetria; pequenas variações de coordenadas podem acarretar em grandes diferenças altimétricas. Infelizmente não foi possível constatar se o padrão seria mantido para a declividade montanhosa, pois não havia pontos GPS suficientes para avaliar este estrato.

Em relação ao aspecto este e ao estrato sem aspecto (declividade plana), o teste *t* apontou erros médios diferentes (**Tabela 2**). Também se verificou que o estrato sem aspecto resultou em erro médio e desvio-padrão menor que aquele com aspecto leste. Estes resultados talvez possam ser explicados pelo fato de que áreas sem aspecto são áreas com declividade plana. Portanto, ao aspecto este estão associadas declividades onduladas e/ou montanhosas, mais sujeitas à resultados inferiores de acurácia.

Tabela 2 – Testes de Hipóteses para $\alpha = 5\%$.

COMPARAÇÕES	TESTE F valor-p para igualdade de variâncias	TESTE <i>t</i> valor-p para igualdade de médias
DECLIVIDADE PLANA X DECLIVIDADE ONDULADA	0,999	0,003
SEM ASPECTO X ASPECTO ESTE	0,885	4,45.10 ⁻⁶
CLASSE CULTURA-PASTAGEM X CLASSE ÁREA URBANA	0,984	0,270
CLASSE CULTURA-PASTAGEM X CLASSE ÁREA URBANA (SEM HV69)	0,855	0,010
ESTRATO PLANO/SEM ASPECTO/CULTURA-PASTAGEM X ESTRATO PLANO/SEM ASPECTO/ÁREA URBANA	0,677	0,009
ESTRATO PLANO/SEM ASPECTO/ÁREA URBANA X ESTRATO ONDULADA/ESTE/ÁREA URBANA	0,659	6,29.10 ⁻⁴

As classes cultura-pastagem e área urbana não apresentaram um erro médio significativamente diferente, contrariando as expectativas. Analisando-se os dados, foi detectado um ponto GPS (HV69) na classe cultura/pastagem com um erro muito alto em relação aos demais (18,67 m). A remoção deste ponto causou uma redução do erro médio para 3,07 m e do desvio-padrão para 2,27 m superando então a classe área urbana. Porém, mesmo com a exclusão do ponto HV69 não houve a rejeição da hipótese nula ao nível de 95%.

Quanto aos cruzamentos, todos tiveram erros médios significativamente diferentes, valores positivos nos intervalos de confiança para o erro médio. O melhor resultado nas estatísticas foi alcançado pelo estrato declividade plana/sem aspecto/classe cultura-pastagem, provavelmente por apresentar uma combinação dos estratos com melhores desempenhos. Esta hipótese é corroborada pelo estrato declividade ondulada/aspecto este/classe área urbana ter mostrado um erro inferior.

6. Conclusão

A metodologia proposta permitiu identificar o comportamento do MDT SRTM em diversos estratos. Os testes de hipóteses realizados mostram que os estratos são significativamente diferentes com um nível de significância de 5%. A única exceção ocorreu com as classes de uso/cobertura do solo, cujos erros médios para os dois estratos são significativamente semelhantes. As classes cultura-pastagem e área urbana não foram consideradas significativamente diferentes pelo teste de hipóteses, mesmo após a remoção do ponto HV69. Estes resultados permitem afirmar que o modelo interferométrico foi influenciado pela declividade e pelo aspecto.

O MDT SRTM superestimou a altitude em todos os estratos, conforme os resultados dos testes para a média dos erros. Os menores erros estão relacionados à declividade plana (sem aspecto) e classe cultura-pastagem, conforme pôde ser observado individualmente ou em conjunto. Espera-se que novas análises, com uma maior quantidade de pontos GPS, possam confirmar estes resultados, bem como permitir um estudo dos estratos não avaliadas neste trabalho.

Referências

- De Biase, M. A carta clinografica: os métodos de representação e sua confecção. **Revista de Geografia**, v. 6, p. 45-60, 1993.
- Evans, I.S. General geomorphometry, derivatives of altitude and descriptive statistics. In: Chorley, R.J. (Ed.), **Spatial Analysis in Geomorphology**, pp. 36-41. Methuen, 1972.
- Gelautz, M.; Paillou, P.; Chen, C. W.; Zebker, H. A. Radar stereo- and interferometric-derived digital elevation models: comparison and combination using Radarsat and ERS-2 imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v. 24, n. 24, p. 5243-5264, 2003.
- Henderson, F. M.; Lewis, A. J. **Manual of remote sensing: principles and applications of imaging radar**, 3rd edition. USA: John Wiley Sons, 1998. v. 2, 896p.
- Hodgson, M. E.; Jensen, J. R.; Schmidt, L.; Schill, S.; Davis, B. An evaluation of LIDAR- and IFSAR-derived digital elevation models in leaf-on conditions with USGS level 1 and level 2 DEMs. **Remote Sensing of Environment**, v. 84, p. 295-308, 2003.
- Ludwig, R.; Schneider, P. Validation of digital elevation models from SRTM X-SAR for applications in hydrologic modeling. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 60, p. 339-358, 2006.
- Madsen, S. N.; Zebker, H. A.; Martin, J. Topographic mapping using radar interferometry: processing techniques. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 31, n. 1, p. 246-256, 1993.
- Morelli, A. F.; Cavalheiro, F.; Alves, M. A.; Fantin, M. Representação espacial da cobertura vegetal natural original do município de São José dos Campos (SP). In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2003, p. 681-689.
- Pike, R. J. **A bibliography of terrain modeling (geomorphometry), the quantitative representation of topography-supplement 4.0**. Menlo Park, CA: USGS, 2002. Disponível em: <<http://wrgis.wr.usgs.gov/openfile/of02-465/>> Acesso em: 03 jan 06.
- Rabus, B.; Eineder, M.; Roth, A.; Bamler, R. The shuttle radar topography mission – a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 57, p. 241-262, 2003.

Rodriguez, E.; Morris, C. S.; Belz, J. E.; Chapin, E. C.; Martin, J. M.; Daffer, S. **An assessment of the SRTM topographic products**: Pasadena, CA: JPL, 2005. Disponível em: <<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/srtmBibliography.html>>. Acesso em: 15 set 06.

Sant'Anna, S. J. S.; Freitas, C. C. Um estudo monte carlo na avaliação de erro em modelos digitais de elevação. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p3579-3586. CD-ROM.

Small, D.; Nüesch, N. **Validation of height models from ERS interferometry**. Disponível em: <<http://www.geo.unizh.ch/rsl/fringe96/papers/small-nuesch/>> Acesso em: 12 mar 06.

Toutin, T. Impact of terrain slope and aspect on radargrammetric DEM accuracy. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 57, p. 228-240, 2002.

Valeriano, M. M. **Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2004. 72 p. (INPE-10550-RPQ/756).

Wu, X.; Thiel, K.; Wehr, A. **The effects of different land covers on the accuracy of interferometric DEM**. 1996. Disponível em: <<http://www.geo.unizh.ch/rsl/fringe96/papers/thiel-wu-2/>> Acesso em: 12 mar 06.