

Comparação quantitativa e qualitativa entre o Modelo Digital gerado pelo SRTM e por aerofotogrametria

Rodrigo Affonso de Albuquerque Nóbrega
Claudomiro dos Santos
Jorge Pimentel Cintra

Universidade de São Paulo - USP/Poli
Av. Prof. Luciano Gualberto, trav. 3, nº 380, CEP 05508-900 – São Paulo - SP, Brasil
{ rodrigo.nobrega, claudomiro.santos }@poli.usp.br; jpcintra@usp.br

Abstract. The present paper reports a qualitative and a quantitative comparison among the SRTM DEM and the contours extracted by Photogrammetry. A visual three-dimensional inspection was executed on the DEM over the stereo models by using a photogrammetric workstation. On the other hand, a referential surface was constructed by the contours and other by the SRTM DEM. Some analyses were executed through the discrepancies values among them. However the results show the strong correlation between the two surfaces, a statistical test proves that difference between local and global values is meaningful, regarding some circumstances of the data.

Palavras-chave: sensoriamento remoto, fotogrametria, modelo digital de elevação, SRTM, interferometria, remote sensing, photogrammetry, digital model elevation, SRTM, interferometry.

1. Introdução

Em fevereiro de 2000 realizou-se uma missão conjunta entre a NASA, a Agência Espacial Italiana e o Centro Aerospacial Alemão com o intuito de desenvolver um Modelo Digital de Elevação MDE da superfície terrestre utilizando radares interferométricos a bordo do ônibus espacial Endeavor. A missão, identificada com a sigla SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), desenvolveu e disponibilizou um MDE global com precisão vertical absoluta informada de +/- 16m com intervalo de confiança de 90% (Suchandt, 2001). Segundo Zeilhofer (2001) e Nobrega et al (2004), o emprego destes dados como fonte de informação altimétrica pode vir a suprir as necessidades decorrentes da ausência ou escassez de cartografia em muitas regiões do globo terrestre, por sua vez, causadas pela dificuldade de acesso ou pela carência de projetos de mapeamento sistemático. Essas duas situações ocorrem e se enquadram na realidade da cartografia nacional.

Nesse sentido, a fim de avaliar o potencial e a aplicabilidade destes dados, o presente trabalho descreve algumas análises realizadas a partir de comparações entre dados altimétricos obtidos através de restituição fotogramétrica e os dados altimétricos do SRTM, distribuídos gratuitamente pelo serviço geológico norte-americano (USGS – United States Geological Survey). A análise foi realizada a partir da comparação dos valores de elevação entre a superfície gerada pelos dados do SRTM e da superfície gerada pelos dados restituídos do Projeto Cabucu de Baixo. Para isso, utilizou-se uma malha regular, em que cada elemento está associado a dois valores de elevação. A superfície descrita pelos elementos restituídos por aerofotogrametria em escala 1:2000 foi considerada como referencial para as análises, devido à natureza e precisão do processo. Calculadas as discrepâncias pontuais entre ambas as superfícies, alguns testes estatísticos foram aplicados a fim de testar a compatibilidade entre as mesmas. No entanto, a fim de ampliar a análise e o conhecimento sobre o comportamento dessa nova fonte de informação, foram utilizados recursos gráficos de Fotogrametria para visualização tridimensional da superfície gerada pelos dados do SRTM sobreposta a modelos estereoscópicos das fotografias aéreas. Embora qualitativa, essa análise serviu para avaliar a aderência entre os diferentes dados e visualizar as discrepâncias entre o SRTM e os modelos estereoscópicos aerotriangulados.

1.1 Objetivos

Embora os dados altimétricos originais do SRTM sejam formados por uma malha regular com espaçamento aproximado de 1 segundo (cerca de 30X30m cosφ), os dados disponibilizados gratuitamente pelo USGS sofreram uma significativa redução quanto à densidade de pontos, resultando em uma malha com espaçamento 90X90m. Boa parte dos usuários desconhece tal informação e não existe uma informação embasada, acerca da qualidade desses dados gratuitos. Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a acurácia do MDE global do SRTM distribuído gratuitamente, utilizando como referência dados altimétricos provenientes de uma restituição fotogramétrica de maior escala. Também, através do uso de uma estação fotogramétrica digital, foi feita uma avaliação da “aderência” desse MDE às variações do relevo.

1.1 Justificativa

Este trabalho justifica-se por avaliar a qualidade de dados altimétricos do SRTM disponibilizados para todos os usuários, em especial por se tratar de uma amostragem executada numa área do território brasileiro que possui mapeamento recente de alta precisão. Os métodos de avaliação aqui utilizados procuram cobrir análises quantitativas, utilizando procedimentos estatísticos, e qualitativa, utilizando recursos de visualização tridimensional. Ambas as análises foram desenvolvidas com base em comparações entre a superfície gerada pelo SRTM e uma superfície obtida por métodos tradicionais de fotogrametria. Espera-se que os resultados obtidos com essas análises possam servir de referência para trabalhos futuros.

2. Materiais e Métodos

2.1 Área de Estudo

A área de estudo corresponde à bacia hidrográfica do córrego do Cabuçu de Baixo, localizada no extremo norte do município de São Paulo-SP, compreendida entre as latitudes 23° 30' 30”S e 23° 24' 30”S e as longitudes 46° 43' 50”W e 46° 37' 30”W, em uma área de aproximadamente 42 Km² e perímetro de aproximadamente 45 Km (Figura 1). Sua extensão abrange parte da Serra da Cantareira, limitada pelas divisas entre os municípios de São Paulo, Mairiporã e Caieiras. Ao sul a bacia sofre um estreitamento até sua jusante no Rio Tietê.

A escolha dessa área foi viabilizada por fatores como disponibilidade de imagens digitais, restituição fotogramétrica, ortofotos e pontos de controle. O Projeto Cabuçu de Baixo foi desenvolvido pelo Departamento de Hidráulica da Escola Politécnica da USP, em parceria com o Laboratório de Geoprocessamento da mesma instituição. Outro fator que contribuiu para a escolha da área de estudo foi a variação acentuada do relevo, que permite mensurar a aderência do modelo digital gerado pelo SRTM em regiões acidentadas.

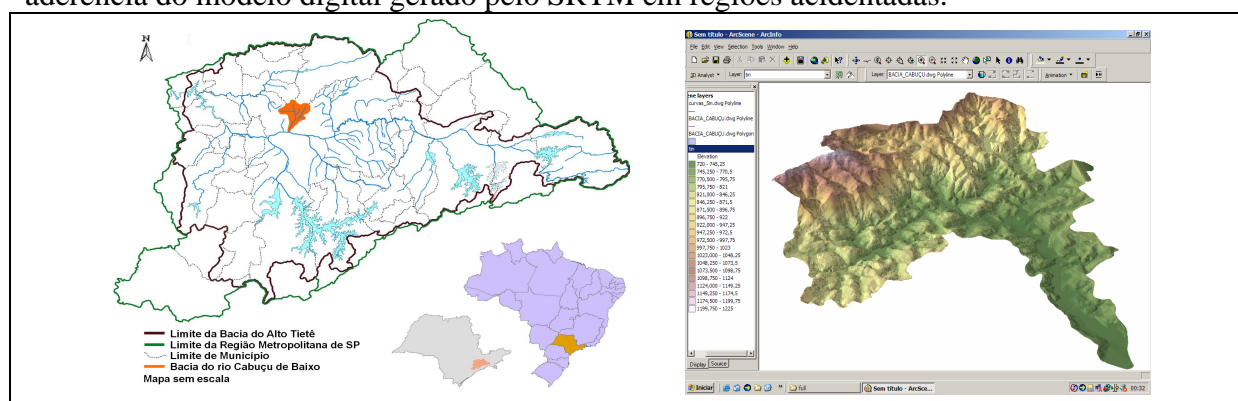


Figura 1. Ilustração sem escala da localização da área do projeto e do respectivo relevo.

2.2 O Projeto Cabuçu de Baixo

O Projeto Cabuçu de Baixo visou estudar as transformações ocorridas com o crescimento urbano desordenado, em particular, com a finalidade de fornecer subsídios mensuráveis que pudessem ser inseridos em um sistema de suporte a decisões voltado ao estudo de escoamento superficial das águas e de simulações de enchentes e pontos de alagamento. Para isso, foi necessário reunir informações sócio-econômicas, dados de vazão dos córregos e afluentes, classificação de cobertura do solo e, principalmente, um modelo digital da altimetria compatível às necessidades do projeto.

Para o modelo altimétrico, a princípio, adotou-se as curvas de nível do Sistema Cartográfico Metropolitano, do extinto GEGRAN (Grupo Executivo da Grande São Paulo). No entanto, seu emprego fora inviabilizado por dois principais motivos: incompatibilidade de data e de escala. Mediante a esse problema, o modelo altimétrico do projeto contou com o mapeamento de toda a extensão da bacia hidrográfica, utilizando fotografias aéreas de escala 1:8000 de setembro de 2003. A altimetria final foi composta por curvas de nível com espaçamento de 5 metros e espaçamento de 1 metro nas regiões mais baixas, visando subsidiar as simulações dos pontos de alagamento. Como referência, foram levantados 29 pontos de controle utilizando receptores GPS de frequência L1. O erro médio quadrático (RMS) relativo ao ajustamento da aerotriangulação das fotografias aéreas foi de 0,44 ; 0,48 e 0,28 metros, respectivamente para Este, Norte e Elevação. O projeto foi referenciado ao sistema Córrego Alegre, pela compatibilidade aos demais dados utilizados.

2.3 SRTM

O SRTM foi lançado em 11 de fevereiro de 2000 e necessitou de 11 dias para concluir a varredura do globo terrestre entre as latitudes 60° N e 57° S. O SRTM foi equipado por dois radares interferométricos operando na faixa do espectro eletromagnético correspondente a banda de microondas com comprimento de onda de 3,1 cm (banda X) e 5,6 cm (banda C). Os sensores contaram com duas antenas de transmissão/recepção e uma antena apenas de recepção instalada numa haste de 60m de comprimento. A Figura 2 representa a configuração dos sensores durante a operação transportada pelo ônibus espacial.

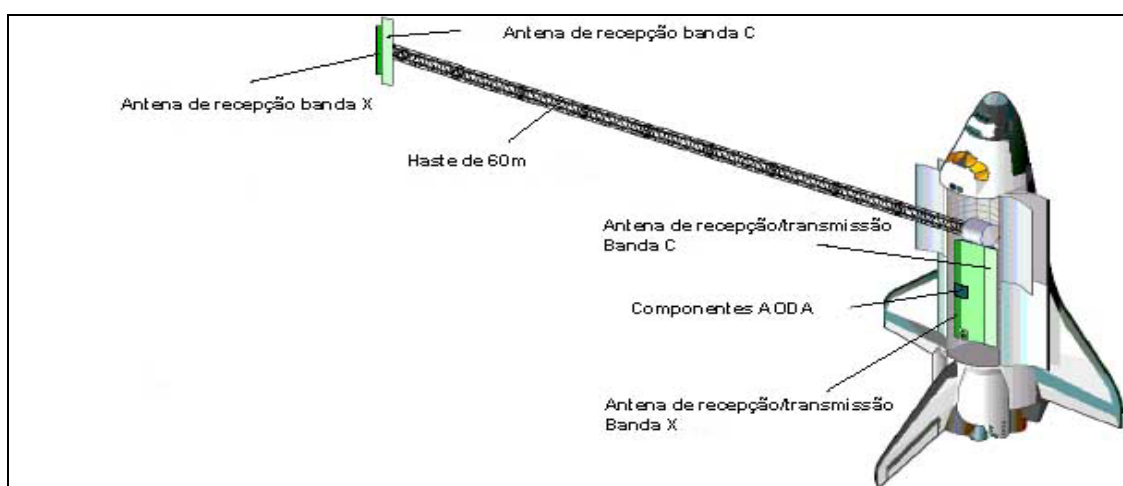


Figura 2. Configuração do SRTM e algumas características do X-SAR (banda X).

A Tabela 1 apresenta as precisões dos dados do SRTM, os quais foram tomadas como referência para as análises deste trabalho.

Tabela 1 Especificações de precisão do MDE SRTM X-SAR. Fonte: Suchandt et al (2001).

Horizontal (absoluta)	+/- 20m (90% circular)
Horizontal (relativa)	+/- 15m (90% circular)
Vertical (absoluta)	+/- 16m (90% circular)
Vertical (relativa)	+/- 6m (90% circular)

Os dados do sensor SRTM utilizados foram extraídos gratuitamente do endereço "http://seamless.usgs.gov/" em 29/07/2004. Correspondem a um arquivo no formato ArcGrid referenciado ao WGS-84, equivalente a uma malha quadrada regular com espaçamento de 90X90 metros, abrangendo toda a bacia do Córrego do Cabuçu.

2.4 Recursos Computacionais

O desenvolvimento desse trabalho contou com o uso do programa Socet Set®, da BAE Systems Corporation, que engloba um pacote de aplicativos voltado a Fotogrametria. As principais ferramentas correspondem aos módulos de visualização estereoscópica, aerotriangulação, restituição, modelagem digital de terreno e ortoretificação de imagens. O Socet Set tem como principal atrativo, uma coleção de rotinas automáticas que permitem aos usuários reduzir o tempo de produção. No entanto, apenas alguns desses recursos foram utilizados nesse trabalho, uma vez que os processos de aerotriangulação e restituição da altimetria da bacia hidrográfica já haviam sido executados. Vide Nóbrega et al (2004).

Foram utilizados alguns dos aplicativos do ArcGIS 8.3, como o Arcscene, para tratamento dos dados do SRTM. Da mesma forma, foi utilizado o Softdesk Civil 7.0, que opera sobre a plataforma do AutoCAD. Nesse aplicativo, foi gerada a superfície a partir dos dados vetoriais do SRTM, advindos do ArcGIS 8.3, e a superfície a partir dos dados restituídos do Projeto Cabuçu de Baixo. Ainda no Softdesk Civil 7.0, foi gerada uma malha regular a qual foi projetada sobre cada uma das superfícies, cujos valores foram comparados.

3. Metodologia

3.1 Compatibilização entre os referenciais

Embora os sistemas de referência adotados no Brasil utilizem a altitude ortométrica do marégrafo de Imbituba-SC como datum vertical, optou-se no presente trabalho por utilizar diretamente a altura elipsoidal como referência para as comparações entre as duas superfícies.

Desta forma, o primeiro passo para analisar as discrepâncias entre os dois modelos altimétricos distintos foi a compatibilização dos sistemas de referência adotados. Sabe-se que os dados altimétricos do SRTM estão referenciados ao sistema WGS-84 e que a altimetria do Projeto Cabuçu está referenciada ao datum Córrego Alegre. Nessa etapa, priorizou-se trabalhar com todos os dados referenciados ao sistema WGS-84, o que exigiu que os dados altimétricos do Projeto Cabuçu fossem devidamente convertidos.

Assim, os arquivos relativos ao projeto Cabuçu foram convertidos para o sistema WGS-84, utilizando o programa Socet Set ®. Nesse processo, foram alterados desde os arquivos referentes à orientação das imagens aéreas, das coordenadas dos pontos de controle em campo, como também os arquivos relativos às feições restituídas do terreno, como as curvas de nível.

Esse processo de transformação não teve como finalidade somente a compatibilização entre as curvas de nível restituídas e o MDE gerado pelo SRTM. Uma vez compatibilizados os dados, também foi possível utilizar o Socet Set para visualização simultânea dos modelos estereoscópicos sobrepostos ao MDE do SRTM.

3.2 Comparação entre a altimetria do SRTM e do projeto Cabuçu

De forma análoga à etapa de compatibilização descrita anteriormente, para a comparação entre os modelos altimétricos foi necessário compatibilizar os dados entre ambas as superfícies. Estimou-se que quanto mais íntegras fossem as informações do SRTM, mais fiel seria o resultado do trabalho. Ao mesmo tempo, sendo os dados originais de restituição formados por curvas de nível, linhas de quebra (*breaklines*) e por pontos de cota, distribuídos no terreno de forma densa, qualquer processamento desses elementos, a fim de gerar uma superfície por triângulos irregulares demandaria pouca perda de informação, uma vez que a superfície descrita pelas curvas de nível restituídas foi considerada como referência para esse trabalho. Desta forma, as curvas de nível e os pontos de cota foram adicionados no módulo de modelagem digital de terreno do Softdesk Civil 7.0, dando origem a uma superfície, utilizando a triangulação de Delaunay como base do processo. Estima-se que o erro atribuído a esse processo seja da ordem de alguns centímetros, devido à dimensão reduzida dos triângulos, o que passa a ser desprezível quando comparado à precisão dos dados do SRTM.

Os dados do SRTM foram importados no sistema ArcGIS 8.3, os quais, de forma análoga às curvas de nível, deram origem a uma superfície formada por triângulos, que foram exportados na forma vetorial para o Softdesk Civil 7.0, dando origem a uma segunda superfície. De posse das duas superfícies, a análise foi apoiada na comparação direta dos valores das cotas entre ambas, considerando a mesma posição planimétrica. Desta forma, criou-se uma malha regular de pontos para tal amostragem, onde, para cada posição plana, existem duas posições altimétricas correspondentes. A diferença desses valores altimétricos deu origem ao vetor das discrepâncias, totalizando uma amostragem de 3958 elementos, distribuídos numa malha regular com espaçamentos de 90X90.

3.3 Análise Estereoscópica do SRTM

O desenvolvimento da análise visual da superfície formada pelos dados do SRTM em um ambiente tridimensional foi estimulado pela necessidade de se conhecer o seu comportamento em relação aos diferentes padrões de cobertura e de variação do relevo. A disponibilidade dos dados (fotografias aéreas aerotrianguladas, restituição altimétrica) e dos recursos computacionais (sistema fotogramétrico Socet Set e estereoscópio de tela Screen Scope) foram fundamentais para a viabilização dessa análise.

Utilizando os mesmos recursos fotogramétricos adotados no Projeto Cabuçu de Baixo, alguns modelos estereoscópicos (pares de fotografias aéreas orientadas) foram selecionados, considerando fatores como a variação do padrão de cobertura do solo, como vegetação densa, solo exposto, edificações de pequeno e grande porte, como também a variação do relevo, entre suave, ondulada e abrupta, uma vez que a região dispõe de poucas áreas planas.

Uma vez carregados os modelos estereoscópicos, os dados provenientes do MDE do SRTM foram importados sob a forma de uma malha triangular irregular e de curvas de nível interpoladas a cada 5 metros. A visualização simultânea desses dados sobre o modelo tridimensional tornou possível a avaliação de detalhes sobre a aderência entre as superfícies, demonstrada numericamente pela forte correlação existente, relatada no item 4.2, Tabela 3.

4. Resultados

4.1 Análise Qualitativa

As análises propostas permitiram avaliar qualitativa e quantitativamente o MDE do SRTM. Qualitativamente, o comportamento do MDE, observado em estereoscopia, mostrou-se adequado ao representar as variações da superfície física do terreno. No entanto, foi detectado que algumas regiões fogem à essa regra, talvez devido à presença maciça de edificações que,

embora baixas, podem ter interferido na detecção da superfície física do terreno por parte do sistema sensor, causando um viés local, ao passo que no processo de restituição fotogramétrica, o operador desconsidera a edificação, traçando a altimetria a partir de observações tangentes ao solo.

No tocante a morfologia do terreno, o MDE do SRTM fornece uma representação fiel, porém, dependente da escala de observação. Observações em escala reduzida, que privilegiam a visualização global da superfície e desconsideram o detalhamento local das feições do terreno, mostraram que a morfologia do relevo é acompanhada de perto pelo MDE, incluindo as linhas de drenagem. Por outro lado, observações realizadas com um nível alto de aproximação das imagens (*zoom*) em regiões acidentadas mostraram discrepâncias entre as superfícies. Para a maioria dos casos, as quebras abruptas no terreno, assim como as linhas de drenagem não podem ser reconhecidas no MDT, pelo menos em escalas grandes, o que de certa forma já era esperado, uma vez que a resolução da malha do SRTM utilizada nesse trabalho foi de 90X90 metros.

4.2 Análise Quantitativa

Quantitativamente, as análises revelaram que a aderência descrita acima pode, em muitos casos, dependendo da escala e da margem de erro em questão, induzir os usuários a trabalharem com dados inapropriados. Os procedimentos de análise realizados nesse trabalho ocorreram gradualmente, iniciando pela extração dos principais parâmetros estatísticos calculados sobre o vetor dos resíduos entre as duas superfícies, apresentados na Tabela 2, bem como o histograma de freqüências, ilustrado na Figura 3.

Tabela 2 Parâmetros estatísticos calculados dos resíduos entre as duas superfícies.

Média	14.23
Erro padrão	0.19
Desvio padrão	11.73
Variância da amostra	137.48
Curtose	0.02
Assimetria	0.43

O valor médio encontrado pode indicar a introdução de erros sistemáticos no processo, embora tenham sido tomados cuidados quanto às transformações entre os referenciais adotados. Todavia, embora não seja objetivo desse trabalho, uma vez detectados erros dessa natureza, os mesmos deverão ser eliminados e novas análises deverão ser desenvolvidas.

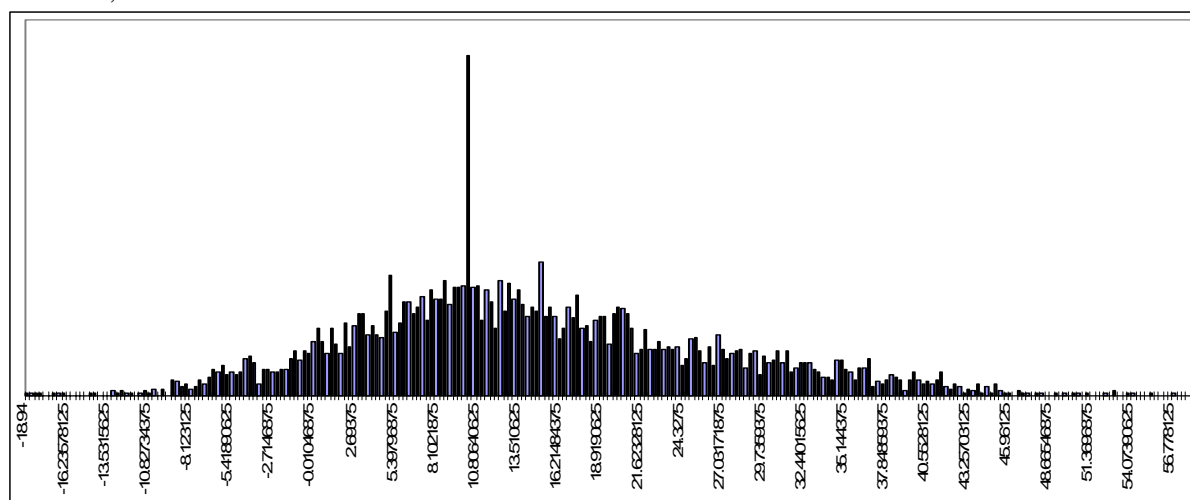


Figura 3 Histograma de distribuição de freqüências dos resíduos entre as duas superfícies

Considerando os valores de elevação para ambas as superfícies, calculou-se a correlação existente (Tabela 3). A forte correlação mostra que o comportamento do DEM do SRTM está diretamente ligado às variações da superfície composta pelos dados restituídos e, conseqüentemente, às variações da superfície física terrestre. A Figura 4 ilustra esse resultado.

Tabela 3 Correlação entre as elevações das duas superfícies para os vértices da malha

	SRTM	CABUÇU
SRTM	1.00	
CABUÇU	0.993354893	1.00

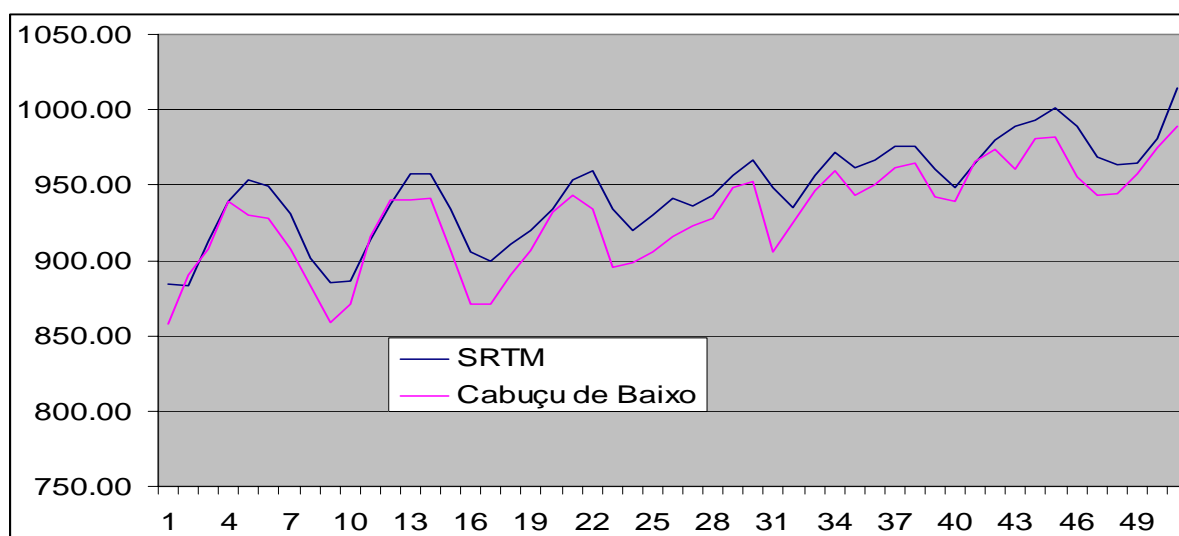


Figura 4 Gráfico de correlação entre os valores de elevação da superfície do Projeto Cabuçu de Baixo e do DEM do SRTM para uma amostra de 50 pontos.

Uma vez calculados os parâmetros estatísticos do vetor das discrepâncias entre as duas superfícies, optou-se na avaliação do valor médio dessa amostra em comparação com as estatísticas fornecidas pelos dados oficiais do SRTM, a fim de testar se a diferença entre a média amostral dos erros e a média global dos erros do SRTM é ou não significativa, utilizando o Teste Z. Todavia, o USGS disponibiliza apenas informações sobre o desvio posicional dos dados e sobre a precisão dos dados refinados, ou seja, apenas para os dados da malha 30X30, que não é disponibilizada gratuitamente. Assim, os dados extrapolados para a malha de 90X90 são disponibilizados, porém sem mencionar sua qualidade. A proposta em avaliar a significância da diferença entre a média amostral dos dados gratuitos do SRTM e uma superfície de referência surgiu como forma de avaliar, em primeira instância, sua qualidade, uma vez que o interesse da comunidade pelo acesso e uso desses dados tem se mostrado crescente.

Para o Teste Z, utilizou-se o valor médio do módulo dos resíduos, sua variância, o nível de significância de 5% (análise uni-caudal devido à utilização dos valores em módulo). A média dos erros do SRTM foi considerada zero e a variância igual a 256, a qual é fornecida. Segundo Lapponi (2000) e Devore (1995), se o *p-value* calculado for maior que o valor do nível de significância, a hipótese nula (médias iguais) deve ser aceita. No entanto, o resultado mostrou que o *p-value* é menor que o valor do nível de significância (vide Tabela 4), o que implica em afirmar que a diferença entre as médias é significativa.

Tabela 4 Resultados da análise da significância da diferença entre duas médias pelo Teste Z.

	Variável 1 (resíduos Cabuçu-SRTM)	Variável 2 Estatísticas do SRTM
Média	15.0719	0.00
Variância conhecida	137.36	256.00
Observações	3957	1
z	0.941930549	
P(Z<=z) uni-caudal	0.173114082	
z crítico uni-caudal	1.644853476	

5. Conclusões e Recomendações

As análises realizadas revelaram um bom comportamento do MDE gerado pelo SRTM na região onde a comparação foi realizada. Tanto na análise visual quanto no cálculo da correlação as superfícies, guardadas as devidas proporções de espaçamento, apresentaram comportamento semelhante apesar da diferença detectada entre as médias pelo Teste Z.

No entanto, analisar os dados do SRTM em outras regiões mapeadas, utilizar mapeamentos em escalas menores (1:10.000, 1:25.000 e 1:50.000) e executar análises sobre os dados SRTM refinados (dados com espaçamento 30m X 30m cosφ), são estudos necessários e que os autores pretendem realizar, com a finalidade de executar uma avaliação mais acurada sobre a precisão e o comportamento dos dados SRTM para a América do Sul.

Referências bibliográficas

- Devore, J. L. **Probability and statistics for engineering and the sciences**. 4th Edition, Brooks/Cole Pub, Belmont, 1995. 743 p.
- Lapponi, J. C. **Estatística usando Excel**. Lapponi Treinamento e Editora, São Paulo, 2000. 450 p.
- LH Systems. **Socet Set user manual**. San Diego: LH Systems, 1998.
- Nóbrega, R. A. A.; Quintanilha, J. A.; Barros, M. T. L. Modelagem digital do terreno como subsídio para a geração da altimetria e das ortofotos para o sistema de suporte a decisões da bacia do Cabuçu de Baixo em São Paulo. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. “no prelo”
- S. Suchandt, H. Breit, N. Adam, M. Eineder, B. Schättler, H. Runge, A. Roth, E. Mikusch. The Shuttle Radar Topography Mission. In: High Resolution Mapping from Space 2001, Hannover, 2001. Joint Workshop of ISPRS Working Groups I/2, I/5 and IV/7. Hannover: ISPRS, 2001. p. 235-242. 1 CD-ROM.
- USGS (2004). **Digital elevation model (DEM) accuracy**. Online GIS training course. Disponível em <http://geology.er.usgs.gov/eespteam/GISLab/Cyprus/dem_standards.htm> Acesso em (25/06/2004).
- Zeilhofer, P. Modelação do relevo e obtenção de parâmetros fisiográficos na Bacia do Rio Cuiabá. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, n. 3, p. 95-109, 2001.
- São Paulo. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. **Sistema de suporte a decisão para gestão das águas urbanas: A bacia do córrego cabuçu de baixo**. Disponível em <<http://www.phd.poli.usp.br/cabuçu/>>. Acesso em (17/07/2004).

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq (Conselho Nacional de a Wild Comercial Importador Ltda pelo fornecimento do programa Socet Set[®] e a equipe do Projeto Cabuçu de Baixo, pelo fornecimento do material.