

Correção de Modelos digitais de Elevação por meio de Elementos Finitos sobre Triangulação, Inverso do Quadrado da Distância, Splines e Krigagem

Marcos A. Timbó Elmiro¹, Luciano V. Dutra¹, José Clúdio Mura¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
C. Postal 515 – 12245-970 – São José dos Campos - SP

timbo@dpi.inpe.br, dutra@dpi.inpe.br, mura@dpi.inpe.br

Abstract. *Digital elevation models are extensively used in spatial analysis. As applications are becoming widespread, so does concern about the quality of data and error propagation. The objective of this paper is presenting a method for elevation models correction that calculates and uses error compensation surfaces generated by triangulation with linear interpolation, inverse squared distance, splines and kriging. The assessment for accuracy certification is provided by statistical quality data extracted from fitted models. Results showed that proposed methods improved geometric quality and provided statistically confident estimation of digital elevation model accuracy.*

Resumo. *Modelos digitais de elevação são muito utilizados em análises espaciais. Com o aumento do uso cresce a preocupação com a qualidade dos dados e propagação dos erros. O objetivo do trabalho é apresentar um método para correção de modelos de elevação capaz de tratar erros globais e locais. O método baseia-se na correção dos modelos para ajustá-los fielmente à realidade geográfica por meio de superfícies de correção calculadas por métodos de interpolação que incluíram triangulação com interpolação linear, ponderação pelo inverso do quadrado da distância, ajuste por splines e krigagem. Os resultados mostraram que a aplicação dos métodos melhorou a qualidade geométrica e forneceu estimativas confiáveis da precisão.*

1. Introdução

Modelos digitais de elevação (MDE) são representações numéricas de dados geográficos do terreno disponíveis no formato de grades regulares e estruturadas de forma adequada para utilização em computadores. Muitas ferramentas de análises espaciais têm sido desenvolvidas para uso com dados geográficos na forma de MDE, que permitem extrair facilmente informações derivadas para uso em diferentes áreas (Maune, 2007).

A construção de MDEs pelo método de Interferometria de Imagens de Radar de Abertura Sintética (InSAR) apresenta vantagens em relação a outras tecnologias de construção de MDEs, principalmente, no mapeamento da elevação de regiões densamente florestadas, como a Amazônia, onde a utilização de métodos baseados em fotogrametria têm sido uma tarefa difícil devido à predominância da cobertura vegetal e à presença constante de nuvens. Na tecnologia InSAR a radiação do espectro das microondas em banda P, além de atravessar as nuvens, atravessa também a massa de

vegetação, podendo atingir potencialmente o solo da floresta. Entretanto, trata-se de uma tecnologia recente, em constante evolução, e apresenta diversos problemas ainda não resolvidos. O objetivo do trabalho é apresentar uma metodologia para a correção da elevação de MDE produzidos pela técnica de Interferometria de imagens SAR, em banda P e banda X, numa área de estudo localizada na Floresta Nacional de Tapajós. O método usa como referência uma estrutura precisa de pontos de controle (PC) de campo, determinada por rastreamento de sinais do sistema GPS e por métodos topográficos com estações eletrônicas de medição.

2. Justificativa e Contribuição

Vários trabalhos já foram realizados abordando essa questão dos tratamentos, ajustes geométricos e melhorias gerais de MDEs provenientes de dados de Sensoriamento Remoto, bem como, de MDEs originados de outras fontes. Alguns estudos iniciais visando melhorias geométricas de MDEs provenientes de fotogrametria foram realizados por Gruen (1985). Ebner e Mueller (1986) e Ebner e Strunz (1988) desenvolveram outros estudos utilizando técnicas de combinação de modelos digitais de elevação. Rosenholm e Torlegard (1988) relataram métodos de correção de MDEs utilizando transformações tridimensionais de similaridade com base no método dos mínimos quadrados. Weik, 1997; Johnson e Kang, 1999; Maas, 2001; Vanden Wyngaerd e Van Gool, 2003 usaram geometria de superfície combinadas com outras informações a fim resolver problemas de ajuste geométrico e combinação de MDEs. Diversas outras aplicações envolvendo correções de MDE foram relatadas na literatura (KARRAS e PETSAS, 1993; MAAS, 2000; MITCHELL e CHADWICK, 1999; PILGRIM, 1996; XU e LI, 2000). A justificativa e contribuição original da pesquisa é apresentar novos métodos que ajustam os MDEs, o mais próximo possível, à realidade geográfica calculando correção por meio de interpolação de superfícies usando deslocamento vertical (*offset*), elementos finitos sobre a triangulação de Delaunay, inverso do quadrado da distância, *splines* e krigagem.

3. Ajuste dos MDE por uma superfície plana (*offset*)

A correção mais simples usada nos MDE foi um *offset* em altura, uma translação dos modelos no eixo vertical cujo valor foi determinado pela média das diferenças de altitudes entre o conjunto de pontos topográficos da estrutura de controle escolhidos para treinamento e os seus correspondentes nos modelos de elevação InSAR. A superfície de correção gerada é plana e os parâmetros estatísticos indicadores da qualidade da correção usando dados de teste, com os arranjos da estrutura de pontos de controle são mostrados na Tabela 1. Os títulos das colunas de todas as tabelas apresentadas no trabalho referem-se, respectivamente, aos MDEs (banda X e banda P), tipos de arranjos de pontos de controle, mínimos, máximos, médias, desvios absolutos (MAE) e desvios padrão dos erros (RMSE) e as unidades de medidas são expressas em metros. Os PC foram divididos em conjuntos de treinamento e de teste organizados em arranjos. O arranjo tipo 3 usa todos os PC como treinamento e teste, o tipo 1 usa 2/3 de treinamento e 1/3 de teste e o tipo 2 usa a metade para cada um. O arranjo tipo 4 corresponde ao tipo 1 com a troca dos PC de teste pelos de treinamento e vice versa e o tipo 5 corresponde ao tipo 2 com a troca dos PC de teste pelos de treinamento e vice versa.

Tabela 1. Indicadores da qualidade da correção dos MDEs pelo método do offset para dados de teste relativos a todos os arranjos de pontos de controle.

MDE	Arranjo	Mínimo	Máximo	Média.	MAE	RMSE
P	1	-7.993	6.923	-0.083	2.413	3.068
	2	-7.955	6.831	-0.182	3.065	3.795
	3	-8.034	6.941	0.000	2.418	3.025
	4	-7.987	6.898	-0.128	2.744	3.437
	5	-7.834	6.741	-0.253	3.038	3.811
X	1	-6.045	8.032	0.066	2.359	2.910
	2	-5.996	7.889	0.173	2.814	3.421
	3	-6.163	8.151	0.000	2.327	2.901
	4	-6.011	7.997	0.122	2.684	3.271
	5	-5.989	7.882	0.238	2.611	3.367

A Figura 1 ilustra de forma esquemática a lógica da correção pelo método do offset, que equivale a somar um valor numérico constante a todos os pixels do MDE.

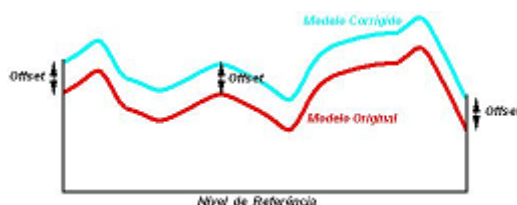


Figura 1. Representação esquemática da correção pelo método do offset.

4. Correção por triangulação com interpolação linear

O segundo nível de correção aplicado aos MDEs consiste na construção de uma superfície determinada por uma malha triangular irregular, definida sobre os pontos de amostras, seguida de interpolação pelo método linear para geração da grade regular que define a superfície de correção. O processo é denominado método de correção por elementos finitos sobre triângulos devido a sua atuação local estritamente dentro dos limites de cada triângulo, formando pedaços independentes que se ligam aos vizinhos pela aresta comum, permitindo ajuste aos erros locais dos MDE (Burrough e McDonnell, 1998; Zhou et al., 2008). A triangulação adotada é baseada no algoritmo de Delaunay que produz uma malha de triângulos onde o círculo definido pelos três vértices de cada triângulo da malha não pode conter no seu interior nenhum ponto do conjunto de amostras além dos vértices do próprio triângulo. Este procedimento maximiza os menores ângulos dos triângulos formados e minimiza os maiores circuncírculos, propiciando uma representação mais ajustada à realidade do relevo geográfico (Burrough e McDonnell, 1998).

A Figura 2-a ilustra uma imagem de tons de cinza da superfície de correção do MDE da banda P e a Figura 2-b refere-se ao MDE da banda X. A localização dos pontos das amostras de treinamento é destacada em vermelho na superfície de correção da banda P. Na representação dos MDEs através de imagens, os tons de cinza mais escuros correspondem aos menores valores numéricos, enquanto os tons mais claros representam os valores numéricos maiores.

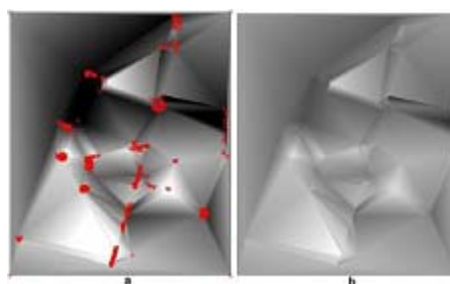


Figura 2. Superfícies de correção por triangulação com interpolação linear: (a) banda P com amostras de treinamento em vermelho e (b) banda X.

A Tabela 2. mostra valores numéricos que indicam a qualidade da correção por triangulação, obtidos a partir dos dados de teste, com os arranjos da estrutura de pontos de controle.

Tabela 2. Indicadores da qualidade da correção pelo método da triangulação.

MDE	Arranjo	Mínimo	Máximo	Média.	MAE	RMSE
P	1	-3.723	3.956	-0.066	1.405	1.864
	2	-4.102	3.942	-0.146	1.581	1.912
	3	-0.491	0.386	0.000	0.043	0.052
	4	-3.157	4.751	-0.103	1.552	1.890
	5	-3.992	4.712	-0.203	1.602	1.947
X	1	-2.427	1.856	0.050	1.230	1.560
	2	-3.216	2.201	0.130	1.303	1.691
	3	-0.450	0.317	0.000	0.031	0.037
	4	-3.139	2.067	0.092	1.298	1.611
	5	-4.216	2.201	0.179	1.303	1.712

5. Superfície de correção pelo inverso do quadrado da distância

O terceiro nível de correção é baseado na geração de uma superfície de correção usando o método de interpolação com valores ponderados pelo inverso do quadrado da distância (IQD). A interpolação pelo IQD supõe explicitamente que as feições mais próximas são mais semelhantes do que as mais separadas. Esta suposição é coerente com a modelagem de dados geográficos e está embutida na base de vários processos de modelagem natural e ambiental (Burrough e McDonnell, 1998). A Figura 3-a ilustra a superfície de correção do MDE banda P e a Figura 3-b a do MDE banda X determinados pelo método de ponderação por IQD. A Tabela 3 mostra os indicadores que representam a qualidade da correção pelo método do IQD para os dados de teste.

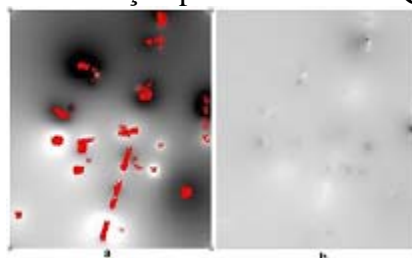


Figura 3. Superfícies de correção pelo IQD, (a) banda P e (b) banda X

Tabela 3. Indicadores numéricos da qualidade da correção pelo método do IQD

MDE	Arranjo	Mínimo	Máximo	Média.	MAE	RMSE
P	1	-3.385	3.597	-0.062	1.368	1.694
	2	-3.729	3.584	-0.137	1.453	1.744
	3	-0.447	0.351	0.000	0.035	0.047
	4	-2.870	4.319	-0.097	1.411	1.715
	5	-3.629	4.284	-0.190	1.456	1.751
X	1	-2.670	2.041	0.053	1.353	1.743
	2	-3.537	2.421	0.139	1.433	1.870
	3	-0.495	0.349	0.000	0.035	0.041
	4	-3.453	2.273	0.098	1.428	1.805
	5	-4.637	2.421	0.190	1.563	1.901

6. Superfície de correção pelo método de splines

Correção de deformações locais pode ser feita por funções fragmentadas que ajustem uma superfície de curvatura mínima aos pontos de amostras. Esta idéia foi adotada no trabalho por meio da aplicação de correção por funções splines que podem produzir bons resultados. A teoria e as aplicações de splines estão disponíveis na literatura da área (Audette et al., 2000; Burrough e McDonnell, 1998). A Figura 4-a ilustra a imagem da superfície de correção pelo método de splines para a banda P e a Figura 4-b mostra a imagem da banda X. A Tabela 4 mostra os indicadores da qualidade da correção pelo método de splines calculados a partir dos dados de teste.

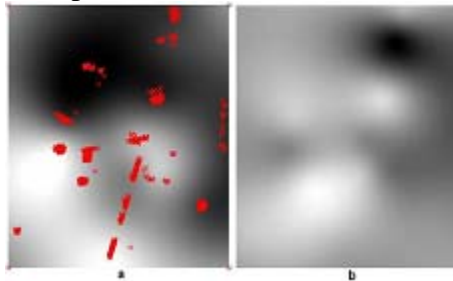


Figura 4. Superfícies de correção por splines, (a) banda P e (b) banda X

Tabela 4. Indicadores da qualidade da correção pelo método de splines.

MDE	Arranjo	Mínimo	Máximo	Média.	MAE	RMSE
P	1	-4.231	4.496	-0.079	1.710	2.118
	2	-4.661	4.480	-0.173	1.817	2.273
	3	-0.559	0.439	0.000	0.041	0.059
	4	-3.588	5.399	-0.122	1.764	2.128
	5	-4.536	5.355	-0.241	1.820	2.254
X	1	-3.034	2.320	0.063	1.538	1.950
	2	-4.020	2.751	0.165	1.691	2.178
	3	-0.562	0.397	0.000	0.032	0.046
	4	-3.924	2.584	0.116	1.623	2.054
	5	-5.270	2.751	0.226	1.812	2.203

7. Superfície de correção pelo método de krigagem

A correção usando krigagem é uma tentativa de fazer a otimização da interpolação através da separação da variação espacial em componentes. A componente de variação espacialmente autocorrelacionada, mas fisicamente difícil de explicar ficou embutida em funções como os autovariogramas e semivariogramas, que fornecem informação para otimização dos pesos e para buscas dos raios de efeito da interpolação (Audette et al., 2000; Burrough e McDonnell, 1998). A Tabela 5 mostra os parâmetros estatísticos indicadores da qualidade da correção dos MDE pelo método da krigagem.

Tabela 5. – Indicadores da qualidade da correção pelo método da krigagem.

MDE	Arranjo	Mínimo	Máximo	Média.	MAE	RMSE
P	1	-3.892	4.136	-0.075	1.573	1.949
	2	-4.288	4.122	-0.164	1.621	1.990
	3	-0.514	0.404	0.000	0.041	0.054
	4	-3.301	4.967	-0.116	1.623	1.976
	5	-4.173	4.927	-0.228	1.675	2.018
X	1	-2.791	2.134	0.059	1.415	1.794
	2	-3.698	2.531	0.156	1.498	1.921
	3	-0.517	0.365	0.000	0.038	0.043
	4	-3.610	2.377	0.110	1.493	1.908
	5	-4.848	2.531	0.214	1.643	2.021

8. Conclusões

Os métodos de correção permitiram fazer ajustes nos modelos InSAR que resultaram em diferentes escalas de melhoria de qualidade, apresentando resultados globais e locais consistentes, determinados numericamente através de análises teóricas e modelos matemáticos. Os resultados revelaram que os dados altimétricos da área de estudo necessitavam de avaliações e correções antes de poderem ser utilizados em aplicações para derivação de produtos a partir das análises desses MDEs. Esta conclusão foi indicada para o caso da Floresta Nacional de Tapajós, mas se aplica a outros casos gerais de MDEs. Vários resultados do trabalho confirmam que aumentando a quantidade de pontos de controle e uniformizando sua distribuição espacial, melhores resultados de precisão são atingidos. Esta conclusão foi inferida porque em cada método

de correção os arranjos do tipo 3 apresentaram os melhores indicadores estatísticos seguidos dos arranjos do tipo 1, 4, 2 e 5, os quais correspondem a uma redução progressiva da quantidade de pontos de controle. Vários resultados mostraram que a aplicação dos métodos de correção, além de melhorar a qualidade geométrica dos MDEs, forneceu também as estimativas numéricas de exatidão globais e locais. Estes indicadores podem ser usados pelos analistas de dados espaciais para estimar, quantitativamente e com apoio de bases matemáticas, os efeitos da propagação de erros nos diferentes produtos que serão derivados das análises desses MDEs.

Referências

Audette, M.A; Ferrie, F.P; Peters, T.M. An algorithmic overview of surface registration techniques for medical imaging. **Medical Image Analysis**, v. 4, p. 201-217, 2000.

Burrough, P.; McDonnell, R. **Principles of geographical Information Systems**. Oxford:: Clarendon, 1998. 333p.

Ebner, H.; Mueller, F. Processing of digital three line imagery using a generalized model for combined point determination. **Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 26, n. 3/1, p. 212-222, 1986.

Ebner, H.; Strunz, G. Combined point determination using Digital Terrain Models as control information. **Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 27, n. n. B11/3, p. 578-587, 1988.

Gruen, A. Adaptive least squares correlation: a powerful image matching technique. **South African Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Cartography**, v.14, n. 3, p. 175-187, 1985.

Johnson, A.E.; Kang, S.B. Registration and integration of textured 3D data. **Image and Vision Computing**, v. 17, n. 2, p. 135-147, 1999.

Karras, G.E.; Petsa, E. DEM matching and detection of deformation in close-range Photogrammetry without control. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 59, 9, p. 1419-1424, 1993.

Maas, H.G. Least-Squares Matching with airborne laserscanning data in a TIN structure. **Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.33,n. 3A, p. 548-555, 2000.

Maas, H.G. On the use of pulse reflectance data for laserscanner strip adjustment. **Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 34, n. 3/W4, 2001.

Maune, D. F. **Digital elevation model technologies and applications**. 2. ed. Bethesda, MD: ASPRS, 2007. 620 p .

Mitchell, H.L.; Chadwick, R.G. Digital Photogrammetric concepts applied to surface deformation studies. **Geomatica**, v. 53, n. 4, p. 405-414, 1999.

Pilgrim, L. Robust estimation applied to surface matching. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 51, n. 5, p. 243-257, 1996.

Rosenholm, D.; Torlegard, K. Three-dimensional absolute orientation of stereo models using Digital Elevation Models. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 54, n. 10, p. 1385-1389, 1988.

Vanden Wyngaerd, J.; Van Gool, L. Combining texture and shape for automatic crude patch registration. IEEE INT. CONFERENCE ON 3D DIGITAL IMAGING AND MODELING, 2003, Banff, Canada. **Proceedings...** Banff: IEEE, 2003. p. 179-186.

Weik, S. Registration of 3-D partial surface models using luminance and depth information. In: IEEE INT. CONF. ON RECENT ADVANCES IN 3D DIGITAL IMAGING AND MODELING, 1997, Ottawa, Canada. **Proceedings...** Ottawa: IEEE, 1997. p. 93-100.

Xu, Z.; Li, Z. Least median of squares matching for automated detection of surface deformations. **Int.Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 33, n. B3, p. 1000-1007, 2000.

Zhou, Q.; Lees, B.; Tang, G. **Advances in digital terrain analysis**. The Netherlands: Springer-Verlag, 2008. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography