

Avaliação de métodos de geração de MDE para a obtenção de observações em superfície real: um estudo de caso no maciço da Tijuca-RJ (*)

Manoel do Couto Fernandes^{1,2}
Paulo Márcio Leal de Menezes²

¹ IBGE - DGC - Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais
Av. República do Chile, 500/ 15^o andar - 20031-070 - Rio de Janeiro - RJ, Brasil
mfernandes@ibge.gov.br

² UFRJ - Depto de Geografia - Lab. de Cartografia (GEOCART)
Av. Brig. Trompowski, SN - 21941- Cidade Universitária - Rio de Janeiro - RJ, Brasil
pmenezes@igeo.ufrj.br

Abstract: The geoecological analysis are based on geoprocessing have been used more often to obtain resolutions of complex and integrative needs, concerning the environmental studies. However, some doubts come up and they need to be resolved through scientific investigations. One of these doubts is not to consider the dimension of data and information to be used, which are not valued from observations on real surface, thus it can not interpret the structure, function and dynamics of geoecological elements of a landscape correctly. According to what was exposed, this paper has the purpose of test some methods of development of DEM (Digital Elevation Model) in areas of irregular relief routine to obtain observations on real surface of linear and plain elements. The study was conducted in Tijuca massif - Rio de Janeiro on scale of 1: 10.000. The results show the better method to construct DEM in this study area, of irregular relief, was the DEM based on triangulated irregular network through Delaunay's method with restriction.

Palavras-chave: geoecology, geoprocessing, DEM, irregular relief, geoecologia, geoprocessamento, MDE, relevo acidentado.

1. Introdução

Nos últimos anos os estudos ambientais de caráter integrativos pautados no entendimento do relacionamento da sociedade com a natureza vêm ganhando grande destaque. Para o desenvolvimento desses estudos alguns autores, como Forman & Godron (1986) e Geoheco (2000), defendem a utilização da geoecologia tendo como suporte o geoprocessamento. Entretanto, a partir do processo de elaboração de modelos conceituais representativos da realidade inerente a utilização do geoprocessamento, alguns questionamentos surgem e necessitam de investigações científicas para serem solucionados (Fernandes, 2004). Um destes é a não consideração da dimensionalidade dos dados e informações a serem trabalhados, os quais não são avaliados a partir de observações em superfície real, podendo mascarar a interpretação da estrutura, funcionalidade e dinâmica dos elementos geoecológicos de uma paisagem.

Mesmo possuindo uma série de alternativas para trabalhar com a dimensionalidade dos elementos de uma paisagem, os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) possuem uma limitação estabelecida pela não consideração da irregularidade do espaço a ser analisado. Assim, mesmo quando trabalha com dados 3D a superfície não é levada em conta como um contínuo dotado de relevo. Dessa forma, os elementos e análises são trabalhados em superfície planimétrica (projetada) e não em superfície real, o que pode mascarar alguns resultados obtidos, principalmente em áreas de relevo acidentado, onde elementos planares e lineares apresentam valores maiores se interpretados em superfície real do que em superfície planimétrica (**Figura 1**).

* Trabalho baseado nos resultados obtidos por Fernandes (2004).

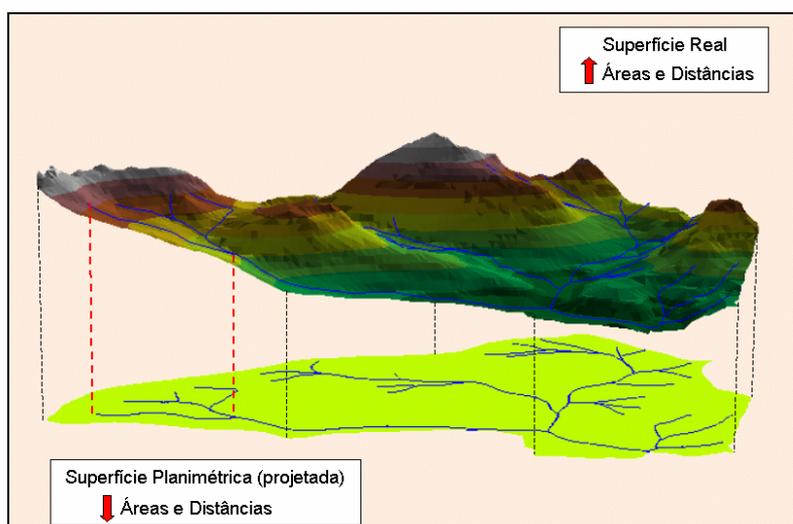


Figura 1 - Diferenciação de área e distância em superfície real e planimétrica na bacia do alto rio Cachoeira - maciço da Tijuca/RJ

A solução da limitação de trabalhar com observações em superfície real, passa necessariamente pela utilização de modelos digitais de elevação (MDE). MDE é definido por Burrough & McDonnell (1998) como qualquer representação digital de uma variação contínua do relevo no espaço. Existem várias aplicações para os MDE. A partir desses pode-se calcular volumes, construir perfis e seções transversais, gerar imagens sombreadas ou em níveis de cinza, gerar mapas de declividade e orientação (aspecto), gerar fatiamentos, perspectivas tridimensionais, e calcular áreas e distâncias em superfície real, que é o foco principal desse trabalho. Entretanto, vale ressaltar que existem diferentes métodos de geração de MDE, os quais podem ser construídos, basicamente, através de grades regulares retangulares (GRID) ou redes irregulares triangulares (TIN), com a utilização de diferentes algoritmos de interpolação. A escolha do melhor modelo depende diretamente da intenção de uso, do tipo de terreno que se queira representar e da disponibilidade dos dados de entrada. A bibliografia mostra alguns trabalhos que testam o melhor modelo para a confecção de MDE, entretanto, não há nenhum consenso definitivo sobre este assunto. Neste sentido, objetivo central deste trabalho é contribuir nesta discussão para definir o melhor modelo de grade e de algoritmo para a construção de um MDE em áreas de relevo acidentado, onde as diferenças de observações em superfície real e planimétrica são mais significativas.

2. Materiais e Métodos

A área utilizada para este estudo é o maciço da Tijuca, que é um maciço litorâneo situado na cidade do Rio de Janeiro (RJ), com relevo bastante acidentado, onde a análise de observações em superfície real é bastante pertinente.

Para definir o melhor método para a construção de MDE foram utilizados interpoladores baseados em grades regulares retangulares e irregulares triangulares.

Os métodos de interpolação de grades regulares retangulares foram:

- Interpolador Kriging – Implementado no *software SURFER* a partir dos valores *default* como: raio de busca, anisotropia e modelo variográfico;
- Interpolador inverso do quadrado da distância – Também implementado no *software SURFER* e utilizando os parâmetros *default*;
- O módulo INTERCON do *software IDRISI*;

- O método de Krigagem Multi-Direcional – Desenvolvido por Guimarães (2000) a partir do interpolador Kriging com o intuito de melhorar o seu desempenho na construção de um MDE;

- O módulo TOPOGRID do *software ARCINFO* - Esse módulo utiliza um método de interpolação especificamente projetado para criar MDE hidrologicamente corretos. É baseado no programa *ANUDEM* desenvolvido por Hutchinson (1989 *apud*. Kozciak *et al.*, 1999). Esse programa estima uma grade (*grid*) regular de uma superfície lisa discretizada através de um grande número de dados de elevação irregularmente espaçados, dados de linhas de contorno e dados de linha de fluxo. Essas características permitem que mesmo utilizando uma grade regular retangular, o TOPOGRID possui a opção de utilizar a drenagem e outros corpos d'água, suavizando e aumentando sensivelmente a precisão dos modelos gerados.

O método de interpolação de grade irregular triangular utilizado foi o de triangulação de Delaunay com restrições, descrito por Felgueiras & Goodchild (1995). Esse método sempre preserva as características topográficas, e utiliza dados de fundamental importância na busca de um maior refinamento do MDE, que são as linhas de máximo (divisores) e linhas de mínimo (hidrografia). Essa interpolação foi executada pela extensão *3D Analyst* do *software ARCVIEW*.

Os métodos de interpolação de grade regular retangular e de grade irregular triangular foram testados em duas etapas, utilizando diferentes bases cartográficas em bacias de drenagem distintas do maciço da Tijuca (**Tabela 1**).

Tabela 1 – Características das etapas do trabalho

ETAPAS	ÁREA	ESCALA	FONTES	EQUIDISTÂNCIA (m)	SIGLA
1ª	Bacia do Quitite/Papagaio	1:10.000	GUIMARÃES (2000)	5	BQP_1:10.000
2ª	Bacia do rio Carioca	1:10.000	IPP	5	MT_1:10.000_IPP

Na primeira etapa todos os métodos foram aplicados para a base BQP_1:10.000. Na verdade, os MDE gerados a partir de grade regular retangular foram compilados de Guimarães (2000). Esses, utilizaram como amostras de entrada, curvas de nível com 5m de equidistância e pontos cotados, e no caso do TOPOGRID as linhas de drenagem. Todos os MDE de grade regular utilizaram *grid* (grade) de 2m de resolução, respeitando a acuidade visual de 0,2mm para essa escala. O MDE gerado a partir da triangulação de Delaunay com restrições, também usou os mesmos dados de entrada, além de linhas de máximo (divisor de bacia) e de mínimo (drenagem).

Para fazer a verificação dos resultados obtidos pelos diferentes métodos de interpolação foram utilizados cinco pontos de controle, que não entraram como amostras para a interpolação, levantados em campo através de GPS e respeitando as mesmas características dos pontos de apoio planimétricos, utilizados para a construção dos modelos estereoscópicos para a geração da base cartográfica.

A base utilizada contempla áreas acidentadas e de relevo suave, abaixo da cota de 40m. Neste sentido, para uma melhor análise dos métodos de interpolação para o estudo pretendido, que é voltado para a área de relevo acidentado, os dois melhores métodos de construção da primeira etapa (TOPOGRID e Delaunay com restrições) foram submetidos, em uma segunda etapa, a um novo teste na área da bacia do rio Carioca, definida pelo divisor da bacia até a cota 40m, ou seja, somente área de relevo acidentado.

Para tanto, foram utilizados a base cartográfica MT_ 1:10000_IPP e os seguintes dados de entrada: curvas de nível com equidistância de 5m, pontos cotados, ponto trigonométricos, drenagem, e no caso específico do interpolador de Delaunay com restrições, a linha de

máximo (limite da bacia). Outra informação importante é que o MDE gerado pelo TOPOGRID utilizou *grid* (grade) de 2m de resolução, respeitando a acuidade visual de 0,2mm para essa escala.

Para a verificação do melhor MDE gerado, foram utilizados 554 pontos cotados retirados de uma base cartográfica de escala 1:2.000, dentre esses alguns próximos ao divisor que para serem aproveitados fez com que os MDE gerados possuíssem uma área de *buffer* de 50m além dos divisores da bacia.

Vale ressaltar que, a base MT_ 1:10000_IPP e a de 1:2.000 de onde foram extraídos os pontos de controle foram construídas a partir da mesma restituição aerofotogramétrica, o que viabilizou o uso de pontos cotados da base de 1:2000 como pontos de controle dos MDE construídos.

3. Avaliação dos Métodos de Geração de MDE

O processo de modelagem de um MDE pode ser definido em três etapas: aquisição das amostras ou amostragem, geração do modelo propriamente dita ou modelagem, e utilização do modelo ou aplicações (Felgueiras, 1999). Cada etapa é decisiva para a qualidade do MDE gerado, sendo também interdependentes, ou seja, uma pode influenciar diretamente na outra. Entretanto, existe uma ordem lógica de estruturação para construção de um MDE, devendo-se inicialmente saber a utilização do MDE, ou seja, o seu objetivo e a sua aplicação. A partir dessa definição já se pode ter noção da área de trabalho, do tipo de terreno que se quer modelar, da disponibilidade de dados de entrada (amostragem) e do tipo de grade e método de interpolação (modelagem) que venha a ter maior eficiência para o modelo gerado.

A bibliografia mostra alguns trabalhos que testam diferentes modelos de grade para a confecção de MDE, entre eles pode-se citar Kumler (1994), que assume a grade regular retangular (GRID) como melhor modelo, e Namikawa (1994), que defende a utilização de TIN.

Para o presente trabalho existe uma tendência definida a partir de vários trabalhos, como os de Berg et al. (2000) e Felgueiras & Goodchild (1995), de se utilizar o método de Delaunay com restrições baseado em TIN. Isso porque o objetivo (aplicação) desse trabalho é a obtenção de observações em superfície real (área e distância) para paisagens de relevo acidentado, e nestes tipos de paisagens, esse método tem se mostrado bastante eficiente. Outro ponto a favor da escolha desse método é a capacidade de inserir feições geomorfológicas que auxiliam decisivamente no refinamento do MDE, além de permitir uma maior facilidade na obtenção dessas observações.

Quando a superfície de análise possui descontinuidades ou grandes variações essas grades apresentam deficiências, o que não ocorre com a utilização de grades irregulares triangulares (Namikawa, 1994). As descontinuidades são representadas por linhas, conhecidas como linhas de quebra (drenagem, divisores, falhas...) que auxiliam na caracterização de uma superfície. Essa característica das grades regulares não significa que todos os métodos que se utilizam desse tipo de grade fiquem presos a essa limitação, um exemplo disso é o módulo TOPOGRID do *software* ARCINFO que possui a opção de utilizar a drenagem e outros corpos d'água como elementos de suavização, aumentando sensivelmente a precisão dos modelos gerados.

Quanto aos métodos de interpolação, a eficiência de cada um está relacionada a sua qualidade de representação. Assim como toda interpolação traduz uma incerteza no ponto estimado, é importante, portanto, saber qual interpolador induz ao menor erro. Nesse sentido, a seleção da técnica de interpolação é fundamental para a geração do modelo. Segundo Burrough & McDonnell (1998), quando os dados são abundantes, a maioria dos métodos de interpolação produz resultados semelhantes, entretanto, no caso de dados esparsos tais

métodos podem apresentar limitações na representação da variabilidade espacial porque desconsideram a anisotropia, ou seja, a descontinuidade do fenômeno que se quer observar.

De maneira geral, os métodos de modelagem existentes nos SIG são utilizados de maneira indiscriminada, sem uma avaliação crítica. Assim, mesmo que não notado pelo usuário, alguns resultados podem comprometer as análises efetuadas.

Em face dessa grande variabilidade de opções de modelagem (tipo de grade e interpoladores), foram testados alguns métodos diferentes de interpolação, para se verificar qual produz melhores resultados para áreas representativas do estudo proposto.

Na bacia do Quitite/Papagaio e adjacências, utilizando a base BQP_1:10.000 os resultados demonstraram, em termos médios para os cinco pontos de controle adotados, que a modelagem baseada no método de Delaunay com restrições pautada em grade irregular triangular obteve o melhor resultado (5,73% de erro médio), seguido do método baseado em grade regular TOPOGRID (com 6,64% de erro médio). Os outros métodos, também baseados em grade regular retangular, obtiveram erros médios bem maiores, variando de 12,73% (Krigagem Multi-direcional), 14,03% (Kriging do *SURFER*) e 20,01% (IQD do *SURFER*) até 57,49% (Intercom do *IDRISI*) (**Figura 2**).

Vale ressaltar, que a área de trabalho (bacia do Quitite/Papagaio e adjacências) envolveu trechos de relevo acidentado e mais suave, por onde os pontos de controle se distribuíram.

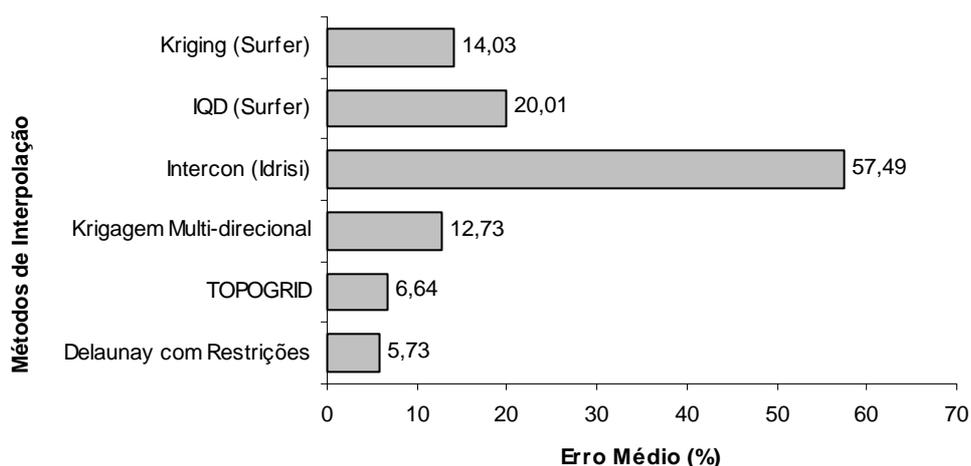


Figura 2 – Gráfico dos erros médios dos métodos de modelagem

Avaliando o comportamento dos modelos gerados em cada ponto foi verificado que somente os métodos de Delaunay com restrições e o TOPOGRID apresentaram erros até 3 m. Todos os outros métodos apresentaram no mínimo três pontos com erro acima desse valor (**Tabela 2**), não sendo recomendados assim, a utilização desses métodos para o trabalho proposto. Os métodos de Krigagem Multi-direcional e Kriging (*SURFER*) apresentaram três pontos com erro acima do PEC (2,5 m), chegando ao máximo de 6,73 m no caso da Krigagem Multi-direcional. Por outro lado, o IQD (*SURFER*) e o Intercom (*IDRISI*) obtiveram quatro pontos acima do PEC, com erros de até 9,3 m e 29,16 m, respectivamente, constituindo assim, nos métodos que apresentaram maiores erros absolutos.

Vale ressaltar, que os pontos que apresentaram erros acima do PEC tem características altimétricas distintas, ou seja, estão em áreas mais suaves e também em áreas mais acidentadas, o que nos sugere uma ineficiência dos modelos na representação do relevo com essas duas características.

Tabela 2 - Diferenças (erros) em metros dos pontos de controle para os pontos obtidos através dos métodos de modelagem

Cota do Ponto de Controle (m)	Delaunay com Restrições	TOPOGRID	Krigagem Multi-direcional	Intercon (Idrisi)	IQD (Surfer)	Kriging (Surfer)
22,86	1,19	-1,20	-0,73	0,16	-1,22	-1,39
398,57	1,82	-2,65	6,73	17,73	7,23	6,54
52,56	-1,23	0,90	3,24	5,46	3,03	3,14
10,79	-2,74	2,73	5,67	29,16	9,30	6,09
291,16	0,50	0,87	0,04	-4,87	-2,64	-0,11

Os dois métodos com melhor comportamento (Delaunay com restrições e TOPOGRID) apresentaram pequenos erros, de no máximo 0,14 m acima do PEC. Apurando mais a análise do PEC, o método de Delaunay com restrições apresentou-se um pouco melhor, com apenas um ponto acima desse parâmetro contra dois pontos do TOPOGRID.

Em nível comportamental o TOPOGRID apresentou os menores erros nos pontos com menores altitudes com pouca quantidade de amostras (informações topográficas), e o método de Delaunay com restrições foi mais bem sucedido nos pontos com maior altitude com muita quantidade de amostras, em conformidade com o que é amplamente afirmado na literatura, ou seja, os métodos baseados em grades irregulares triangulares apresentam maior eficiência em áreas de relevo mais acidentado. O TOPOGRID por utilizar a técnica de interpolação de diferenças finitas conjugando métodos de interpolação global e local, apresenta melhores resultados em áreas de relevo mais suave e menor altitude.

Seguindo essa hipótese, foi constatado que a maior diferença entre os dois métodos ocorreu no ponto de maior altitude (398,57m), onde o método de Delaunay com restrições teve um comportamento muito mais satisfatório, com uma diferença de erro absoluto para o TOPOGRID de -0,83m, ou seja, o TOPOGRID apresentou uma diferença 0,83m a mais que o método de Delaunay com restrições. Contudo, foi constatado que dos três pontos com baixa altitude (10,19m, 22,86m e 52,56m), um deles, o de 22,86m, se comportou ligeiramente melhor quando verificado em relação ao método de Delaunay com restrições, o que contraria a hipótese levantada anteriormente. Entretanto, pode-se afirmar que de uma maneira geral as diferenças dos erros dos dois métodos foram muito pequenas, variando de 0,01m a 0,33 m em áreas mais suaves e de 0,37m a 0,83m em áreas de relevo acidentado.

Em face ao exposto, pode-se afirmar que os erros de ambos os métodos não foram muito significativos, tendo o método de Delaunay com restrições apresentado um erro acumulativo em metros de 7,48m e o TOPOGRID 8,34m. Em média ambos tiveram erros em metros abaixo do PEC (1,50m – Delaunay e 1,67m – TOPOGRID), o que perfeitamente assegura a eficiência desses métodos. A diferença obtida de um para outro em valores absolutos foi de 0,86m e 0,17m em média a favor do método de Delaunay com restrições. Entretanto, pode-se sugerir que esse último foi mais eficiente do que o TOPOGRID, pois teve uma performance melhor em três dos cinco pontos de controle (**Figura 3**), principalmente nas áreas de relevo acidentado, que são áreas de interesse para o trabalho que está sendo desenvolvido.

É importante salientar, que uma leitura mais completa de todos esses métodos passa por um teste que contenha uma quantidade de pontos de controle maior, o que poderá dar mais segurança das sugestões feitas. Para tanto, visando apurar mais os resultados obtidos, os dois melhores métodos levantados (Delaunay com restrições e TOPOGRID) foram submetidos a um novo teste (2ª etapa), em área de relevo acidentado e com número de pontos de controle bem maior (554 pontos).

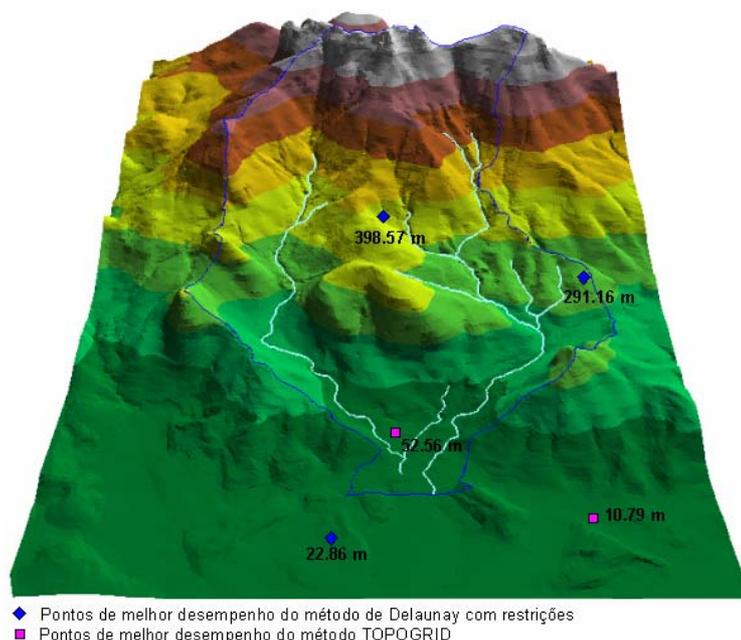


Figura 3 – Identificação dos desempenhos dos pontos de controle da bacia do Quitite/Papagaio

O comportamento dos dois modelos gerados foi muito similar, com uma pequena e não muito significativa melhor resposta do modelo gerado pelo método de Delaunay com restrições. Esse método apresentou erro médio percentual de 1,09% e em metros de 0,99m, contra um erro médio percentual do TOPOGRID de 1,10% e em metros de 1m (**Figura 4**). Comparando o melhor resultado ponto a ponto de controle foi verificado que o resultado também foi bastante semelhante, mas com um desempenho um pouco melhor do modelo gerado pelo método de Delaunay com restrições, onde 47% (259 pontos) apresentaram erros maiores que o TOPOGRID, que teve os 53% (295 pontos) restantes com pior comportamento em relação ao outro método.

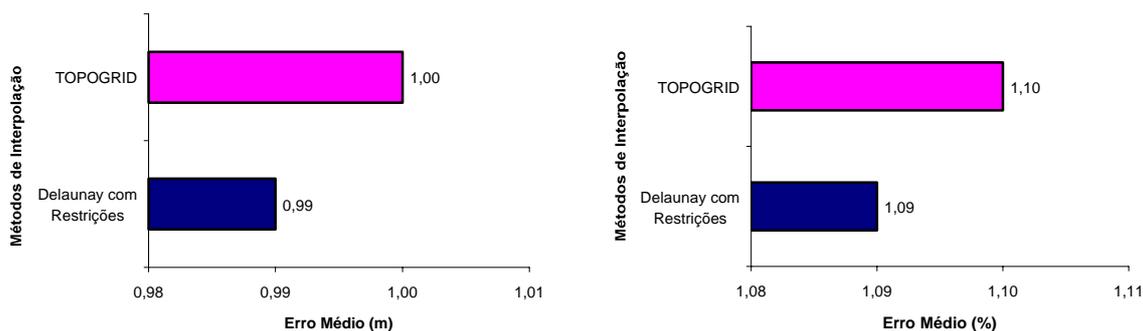


Figura 4 – Gráficos de erro médio (metros e percentual) dos métodos de interpolação

É interessante também ressaltar, que nos poucos pontos acima da faixa de 500m ocorreu um melhor desempenho do método de Delaunay com restrições. Lembrando que a bacia tem uma variação de altitude de 40 a 723m, não houve uma distribuição uniforme dos pontos de controle, onde esses se concentraram de maneira geral na faixa de até 300m, com 97% dos pontos. Assim, se houvesse uma melhor distribuição dos pontos, com uma maior quantidade em áreas de maior declividade e mais altas, acima de 500m, provavelmente o modelo gerado pelo método de Delaunay com restrições teria um resultado mais satisfatório ainda.

4. Conclusões e Considerações Finais

Na avaliação dos métodos de geração de MDE que melhor atendessem o trabalho proposto, foi constatado mediante a utilização de seis métodos, que o método de Delaunay com restrições, baseado em grade irregular triangular e o TOPOGRID, baseado em grade regular retangular, foram os que mostraram melhor desempenho. No teste para a bacia do rio Carioca, realizado com um número de pontos de controle bastante expressivo, o comportamento dos modelos gerados a partir destes dois métodos foi muito similar, com uma ligeira resposta um pouco melhor do modelo gerado pelo método de Delaunay com restrições. Entretanto, comparando o resultado desses dois modelos a cada ponto de controle, o método de Delaunay com restrições demonstrou um desempenho um pouco melhor do que o TOPOGRID, principalmente nas áreas com maior altitude, onde a declividade é mais acentuada e o relevo mais acidentado. Por essas áreas serem o foco principal da discussão do trabalho, o método de Delaunay com restrições foi definido como o método de geração de MDE a ser utilizado para a obtenção de observações em superfície real.

Referências

- Berg, M.; Kreveld, M.V.; Overmars, M. & Schwarzkopf, O. **Computational Geometry Algorithms and Applications**. Springer-Verlag, 2ªed, Germany, 2000. 375p.
- Burrough, P.A. & McDonnell, R.A. **Principles of Geographical Information Systems**. Oxford University Press, New York, 2º ed., 1998. 333 pp.
- Felgueiras, C.A. & Goodchild, M.T. **Two papers on triangulated surface modeling**. Relatório Técnico 95/2. National Center for Geographic Information and Analysis - NCGIA - University of California, Santa Barbara, CA, United States of America, 1995.
- Felgueiras, C.A. Modelagem Numérica do Terreno. **Introdução ao Geoprocessamento**, cap. 6. Disponível em <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro>>. Acessado em: dezembro 1999.
- Fernandes, M. C. **Desenvolvimento de rotina de obtenção de observações em superfície real: uma aplicação em análises geocológicas**. 2004. 263 p. Tese de doutorado - Programa de Pós-Graduação em Geografia, Depto. de Geografia, IGEO/UFRJ.
- Forman, R.T.T. & Godron, M. Overall structure. **Landscape Ecology**. New York: wiley, cap. 6, 1986. pp. 191 - 221.
- Geoheco **Diagnóstico/Prognóstico sobre a Qualidade Ambiental do Geoecossistema do Maciço da Tijuca - subsídios à regulamentação da APARU do Alto da Boa Vista**. Relatório técnico, 3 volumes, 2000.
- Guimarães, R.F. **Utilização de um modelo de previsão de áreas susceptíveis a escorregamentos rasos com controle topográfico: adequação e calibração em duas bacias de drenagem**. 2000. 156 p. Tese de Doutorado, Depto. de Geologia, IGEO/UFRJ.
- Hutchinson, M.F. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. **Journal of Hidrology**. 106, pp. 211-232, 1989.
- Kozciak, S.; Rostirolla, S.P. & Fiori, A.P. Análise comparativa entre métodos de interpolação para construção de modelos numéricos de terreno. **Boletim Paranaense de Geociências**, Ed. da UFPR, (47): 19-30, 1999.
- Kumler, M.P. An intensive comparison of triangulated irregular network (TINs) and digital elevation model (DEMs). **Cartographica**, monograph 45, vol. 31, nº 2, 99p, 1994.
- Namikawa, L.M. A method for triangular grid surface fitting using breaklines. **International Archieves of Photogrammetry and Remote Sensing**, 30(4): 362-368, 1994.