

PRECISÃO NO CÁLCULO DE ÁREAS PLANAS POR PERFILAMENTO A LASER 2: AVALIAÇÃO DA PRECISÃO PLANIMÉTRICA E ALTIMÉTRICA DE CADA PONTO

Fabricio Muller¹, Anderson Roberto da Silva², Roberto Eugenio Bertol³, Simone Montenegro Kraemer⁴

¹Engenheiro civil, Intertechne Consultores S.A., fm@intertechne.com.br

²Eng^o Cartógrafo, Intertechne Consultores, S. A, ardsa@intertechne.com.br

³Superintendente de Estudos Básicos, Intertechne Consultores S.A., reb@intertechne.com.br

⁴Eng^a Cartógrafa, chefe do departamento de cartografia da Intertechne Consultores S.A, smk@intertechne.com.br

RESUMO: Modelos Digitais do Terreno (MDT) são representações da topografia que têm por objetivo a obtenção de diversos produtos topográficos, tais como cálculos de áreas e volumes de reservatórios. Tais modelos possuem erros inerentes à imprecisão dos dados que foram utilizados para a sua elaboração, o que por sua vez irá gerar imprecisões nos diversos produtos que dele forem derivados. O objetivo deste trabalho é analisar o impacto das imprecisões planimétrica e altimétrica inerentes aos pontos levantados por perfilamento a LASER e avaliar o resultado do cálculo da área numa determinada elevação através de simulações Monte Carlo. A metodologia é avaliada em duas áreas (uma menor, com cerca de 0,05 km² e outra, maior, com cerca de 16 km²). As análises efetuadas mostraram que o cálculo da área maior é menos sensível aos erros causados por observações imprecisas que o correspondente cálculo da área menor. Há, contudo, que se ter cuidado ao extrapolar os resultados obtidos neste estudo para outros locais. As duas áreas analisadas se encontram em terrenos ondulado e acidentado, tendendo a apresentar resultados mais satisfatórios do que em áreas em terrenos mais suaves. A partir disto, e também para melhor avaliar a metodologia proposta, sugere-se que novos estudos analisem os critérios e resultados obtidos no presente trabalho.

PALAVRAS-CHAVE: Perfilamento a LASER. Simulação Monte Carlo. Triangulação, TIN.

INTRODUÇÃO: Quando se calcula uma área de um reservatório a partir de um MDT obtido por perfilamento a LASER, a avaliação de dois itens é de grande importância: a precisão planimétrica e altimétrica de cada ponto e a quantidade de pontos por m² para a geração do MDT e conseqüentemente a área calculada atenda às necessidades do projeto a que o reservatório se destina. Na análise destas questões, o presente artigo propõe uma metodologia estatística que, através de simulações Monte Carlo, avalia quais são os efeitos da precisão da medida das coordenadas e da quantidade de pontos observados no cálculo de áreas planas (caso típico de reservatórios).

MATERIAL E MÉTODOS: A seguir são descritas as análises efetuadas no artigo: simulação Monte Carlo; Cálculo de área plana; Simulação do efeito dos erros de observação; avaliar a precisão da área calculada com a diminuição de pontos observados. O método de simulação de Monte Carlo é uma ferramenta matemática comumente utilizada em diversos segmentos da ciência e da engenharia para simular problemas que podem ser representados por processos estocásticos, no qual se utiliza uma seqüência de números aleatórios para a realização de uma simulação. No caso de um perfilamento a LASER, o processo estocástico utilizado no artigo consiste em realizar uma série de simulações da variação de cada ponto quanto à sua precisão planimétrica e altimétrica (ruídos), gerar um MDT pelo método de triangulação e calcular a área numa determinada elevação. Outra simulação efetuada com o Método Monte Carlos consiste em excluir uma quantidade de pontos de forma aleatória e realizar o processo descrito anteriormente, a fim de analisar o quanto a resolução de pontos por m² afeta no valor da área de um reservatório. A área plana que passa por uma determinada elevação é calculada a partir de uma nuvem de pontos obtidos por perfilamento a LASER. Para este fim, inicialmente é gerado um conjunto de superfícies de faces triangulares planas (triangulação), designada por rede irregular de triângulos (TIN). Devido à quantidade de pontos existentes e pelas variações de precisão a serem calculadas individualmente, o algoritmo de triangulação e cálculo de área foi desenvolvido em ambiente Fortran (BOURKE, 1989), obtendo um melhor desempenho computacional para esta finalidade. Posteriormente a área é obtida pela soma das áreas das projeções dos triângulos acima ou abaixo da cota escolhida (conforme o caso) no plano desta cota. A simulação do efeito dos erros de

observação no cálculo de áreas planas é feita somando-se ruídos aleatórios normais com desvios padrão pré-estabelecidos e média zero aos pontos observados, conforme Wechsler (1999). A soma de uma dada série de ruídos com os pontos observados por perfilamento laser resulta numa nova série sintética de pontos. O resultado do cálculo da área plana desta nova série será chamado de área sintética. No presente artigo, são geradas 200 áreas sintéticas para cada cenário de ruídos. Os ruídos aleatórios considerados são simulados sem correlação espacial (que normalmente são presentes em casos reais, conforme Wechsler, 1999). Este critério foi escolhido por ser bastante conservador (WECHSLER, 1999), além de ser de execução simples. De todo modo, sugere-se que em análises futuras também sejam levados em conta também ruídos correlacionados espacialmente. A metodologia para avaliar a precisão da área calculada com a diminuição de pontos observados é feita conforme segue. Depois de estabelecida a porcentagem de pontos retirados para certo caso, gera-se um número aleatório uniforme entre 0 e 100, correspondente a cada coordenada x,y,z. Caso o número gerado seja maior que a porcentagem pré-estabelecida, se mantém a coordenada para o cálculo da área; caso contrário, a coordenada é retirada. A área é calculada com os dados não eliminados. Em outro artigo dos autores (MULLER et. al., 2014), para avaliar o efeito da diminuição da densidade de pontos sobre o cálculo da área, foram retiradas aleatoriamente quantidades crescentes de pontos observados, e avaliada a precisão correspondente no cálculo da área. Tomando como base a metodologia daquele trabalho, para o presente artigo, além da inserção de ruídos, consideram-se cenários com porcentagens de retirada de pontos. Para o cálculo de áreas planas são consideradas duas áreas com terrenos razoavelmente ondulados. Para ambos os casos, foram utilizados pontos no terreno, ou seja, a nuvem de pontos já passou pelo processo de filtragem. A primeira, com 48.453 m² na elevação 1440 m, localiza-se numa região com cobertura vegetal densa, sendo que para o perfilamento a Laser teve uma altura de voo de 1200 m, obtendo uma densidade de pontos no terreno de 0,08 por m², resultando aproximadamente um ponto a cada 3,5 m. Esta área será chamada daqui por diante de área menor. A segunda, com 16.127.548 m² na elevação 875 m localiza-se numa região de savana, sendo que para o perfilamento a Laser teve uma altura de voo de 2000 m, obtendo uma densidade de pontos no terreno de 0,03 por m², resultando aproximadamente um ponto a cada 5,7 m. Esta área será chamada daqui por diante de área maior. A Figura 1 apresenta as duas áreas.

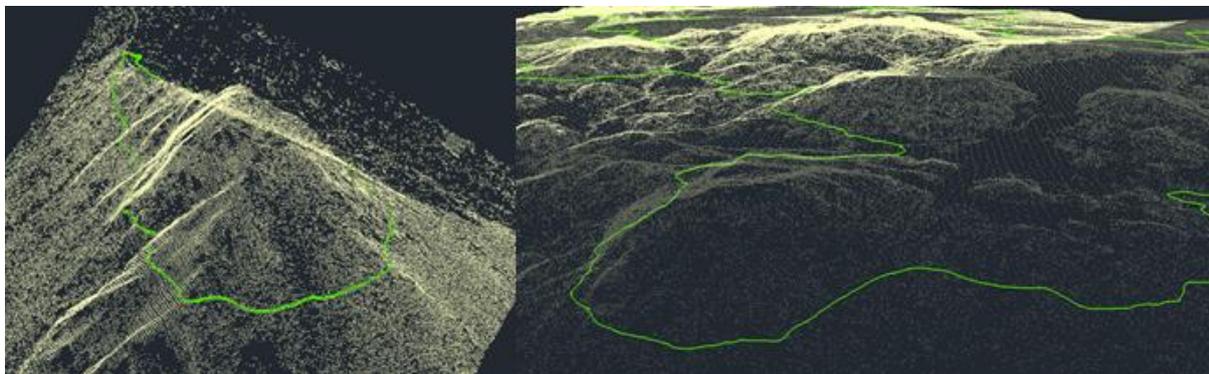


Figura 1: Área menor (à esquerda) e maior (à direita) – visão tridimensional

Foram criados 19 cenários de ruídos altimétricos e planimétricos, e geradas 200 séries sintéticas de pontos (cada série tem o mesmo número de pontos do caso original) para cada um destes cenários. Calculou-se então a área sintética de cada uma destas séries, e foi avaliada a variação da área gerada em função do ruído. Os cenários são os mesmos para as duas áreas, e apresentam os seguintes ruídos normais: Desvios planimétricos (x e y) iguais a 0; 25; 50; 100 e 200 cm; desvios altimétricos (z) iguais a 7,5; 30; 50 e 100 cm. Estes desvios são combinados entre si, criando os cenários apresentados na Tabela 1. Para avaliar melhor o efeito dos ruídos em cada caso, os cenários são os mesmos para a área maior e a menor.

Tabela 1: Cenários de desvios planimétricos (x e y) e altimétricos (z), em metros para criação de séries sintéticas com ruídos.

Cenário	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
x (cm)	0	0	0	25	25	25	25	50	50	50	50	100	100	100	100	200	200	200	200
y (cm)	0	0	0	25	25	25	25	50	50	50	50	100	100	100	100	200	200	200	200
z (cm)	7,5	30	100	0	7,5	30	100	0	7,5	30	100	0	7,5	30	100	0	7,5	30	100

Nos cenários de ruídos com retirada de pontos é avaliada a variação de ruídos em 200 séries sintéticas, conforme os cenários apresentados na Tabela 1, para dois casos de retirada de pontos: 50% e 90%. Para avaliar a variação da área com a variação do ruído são considerados testes que indicam o erro médio (*RMSE* e *%RMSE*) e a tendenciosidade (*BIAS* e *%BIAS*) das áreas geradas por Monte Carlo. O *RMSE* (*Root Mean Square Error* – raiz do erro médio quadrático), em m², e o *%RMSE*, que é o erro médio em relação à área original em %, são apresentados abaixo:

$$\%RMSE = \frac{RMSE}{A_o} \times 1000 = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (A_i - A_o)^2}{N}}}{A_o} \times 1000 \quad (1)$$

Onde *N* = número de séries de retirada de pontos para cada um dos 21 cenários (*N* é igual a 50 no presente estudo); *A_i* = área sintética (m²) calculada por triangulação para cada série *i* de retirada de pontos; *A_o* = é a área calculada para o levantamento laser base em m² (igual a 48.453 m² para a área menor e igual a 16.127.548 m² para a área maior). O *BIAS* ou tendenciosidade, em m², é a diferença entre a média das séries em relação à área original, e o *%BIAS* é o valor do *BIAS* em relação à área original em %. Estas grandezas são apresentadas abaixo:

$$\%BIAS = \frac{BIAS}{A_o} \times 1000 = \frac{\frac{\sum_{i=1}^N (A_i - A_o)}{N}}{A_o} \times 1000 \quad (2)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO: As áreas calculadas para os dois cenários (50% e 90%) de retirada de pontos são apresentadas na Tabela 2, juntamente com a diferença percentual em relação à área original (com 0% de retirada de pontos). Deste modo, estes dois cenários não só apresentam imprecisão devida aos ruídos inseridos, como também à própria retirada dos pontos.

Tabela 2: Áreas calculadas levando em conta retiradas crescentes de coordenadas.

% de pontos retirados	Área maior		Área menor	
	Área (m ²)	Diferença em relação à área original	Área (m ²)	Diferença em relação à área original
0%	16.127.548		48.453	
50%	16.160.229	0,203%	48.372	-0,167%
90%	16.148.116	0,128%	48.427	-0,053%

A Tabela 3 apresenta os resultados de *%RMSE* e *%BIAS* para os seguintes casos: 19 cenários de ruídos originais, nas linhas com 0% de retirada de pontos para as áreas maior e menor; os cenários de ruídos com retirada de pontos, cujas linhas apresentam retiradas de pontos maiores que zero (50% e 90%). Para auxílio na análise, as duas figuras a seguir mostram os valores de *%RMSE* e *%BIAS* obtidos a partir dos resultados da Tabela 3, para os 19 cenários de ruídos e os cenários com 0%, 50% e 90% de pontos retirados. A Figura 2 apresenta os resultados correspondentes para as áreas menor e maior. Ainda a partir dos resultados apresentados anteriormente, a Figura 3 apresenta a variação do *%RMSE* e do *%BIAS* para as áreas menor e maior e para os três cenários de retirada de dados, nos casos com ruídos apenas altimétricos (isto é, com ruídos x e y iguais a zero). De maneira correspondente, a Figura 4 apresenta os resultados respectivos para os casos com ruídos apenas planimétricos.

Tabela 3: Resultados das gerações de áreas sintéticas para os 19 cenários de ruídos apresentados na Tabela 1, considerando diferentes cenários de retirada de pontos.

Cenário	Unid	Cenário =	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
% RMSE	%	Maior	0%	0,4	0,4	0,5	0,2	0,6	0,6	0,6	0,2	0,5	0,5	0,6	0,2	0,5	0,6	0,2	0,5	0,5	0,6
% BIAS	%	Maior	0%	0,4	0,4	0,4	0,1	0,5	0,5	0,5	0,1	0,5	0,5	0,1	0,5	0,5	0,1	0,5	0,1	0,5	0,5
% RMSE	%	Menor	0%	0,3	0,6	1,7	0,4	0,5	0,8	1,8	0,8	0,8	1,0	1,9	1,6	1,7	2,5	2,6	2,6	2,7	3,2
% BIAS	%	Menor	0%	0,3	0,2	0,2	0,0	0,3	0,3	0,2	-0,1	0,2	0,1	0,1	-0,4	-0,2	-0,2	0,0	0,2	0,1	0,4
% RMSE	%	Maior	50%	2,4	2,4	2,4	2,0	2,4	2,4	2,4	2,0	2,4	2,4	2,4	2,0	2,4	2,4	2,4	2,0	2,4	2,4
% BIAS	%	Maior	50%	2,4	2,4	2,4	2,0	2,4	2,4	2,4	2,0	2,4	2,4	2,0	2,4	2,4	2,4	2,0	2,4	2,4	2,4
% RMSE	%	Menor	50%	0,5	0,8	2,3	0,5	0,7	0,9	2,3	0,9	1,0	1,2	2,4	2,4	1,8	1,8	2,8	2,8	3,2	3,3
% BIAS	%	Menor	50%	0,4	0,5	0,7	0,0	0,4	0,5	0,7	-0,1	0,4	0,4	0,7	0,7	0,1	0,1	0,4	0,4	0,5	0,8
% RMSE	%	Maior	90%	1,5	1,5	1,6	1,3	1,5	1,5	1,7	1,4	1,5	1,6	1,7	1,4	1,5	1,6	1,7	1,4	1,5	1,6
% BIAS	%	Maior	90%	1,4	1,4	1,4	1,3	1,5	1,5	1,5	1,4	1,5	1,5	1,5	1,4	1,5	1,5	1,4	1,5	1,5	1,5
% RMSE	%	Menor	90%	0,2	1,1	3,2	0,7	0,7	1,4	3,3	1,2	1,3	1,8	3,5	2,7	2,8	3,2	4,6	6,1	6,1	6,3
% BIAS	%	Menor	90%	0,0	0,0	0,2	-0,3	-0,3	-0,3	0,0	-0,3	-0,3	-0,3	-0,1	-0,3	-0,3	-0,3	-0,1	-1,4	-1,4	-1,4

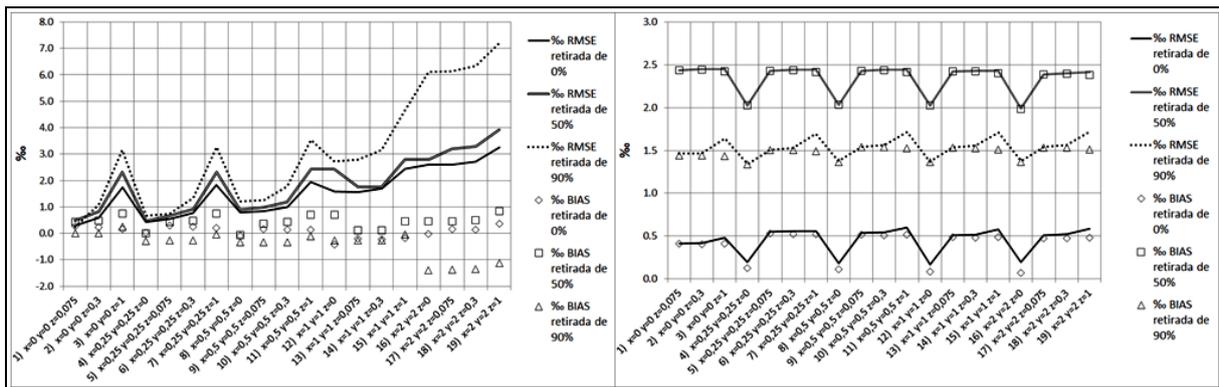


Figura 2: %RMSE (linhas cheias) e %BIAS (marcadores sem linhas) para as áreas menor (à esquerda); e maior (à direita), considerando 0%, 50% e 90% de retirada de pontos para os 19 cenários de ruídos apresentados na Tabela 1.

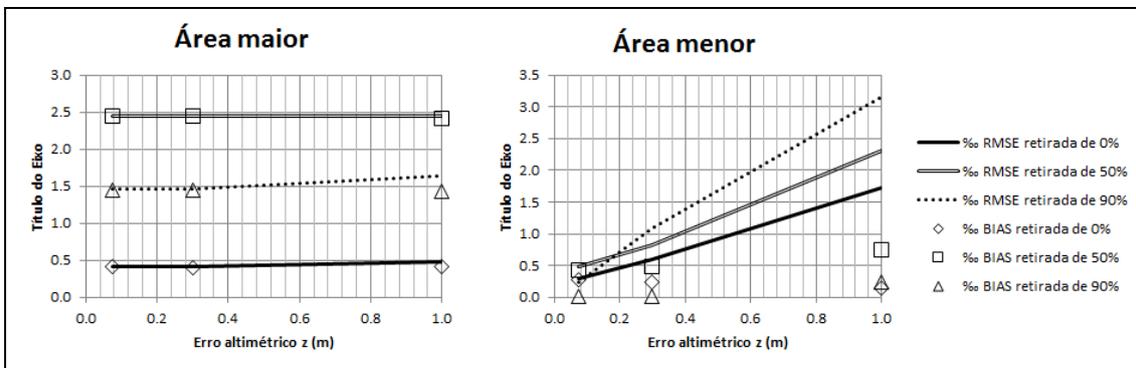


Figura 3: %RMSE (linhas cheias) e %BIAS (marcadores sem linhas) para as áreas menor e maior, considerando 0%, 50% e 90% de retirada de pontos para os cenários com ruídos apenas altimétricos.

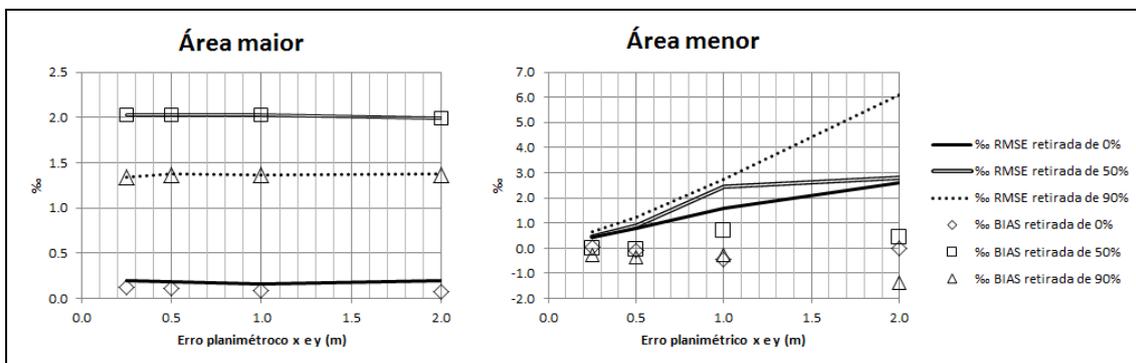


Figura 4: %RMSE (linhas cheias) e %BIAS (marcadores sem linhas) para as áreas menor e maior, considerando 0%, 50% e 90% de retirada de pontos para os cenários com ruídos apenas planimétricos.

Uma análise da Tabela 3 e das Figuras 2 a 4 possibilita as conclusões a seguir. Como era de se esperar, a proporção do erro médio quadrático em relação à área original é mais significativa para a área menor do que para a área maior. Isto pode ser visto na comparação dos valores de %*RMSE* para 0% de retirada dos pontos na Figura 2: enquanto que o valor deste parâmetro para a área menor chega a pouco mais de 3%, para a área maior ele praticamente não ultrapassa 0,6%. Quando se consideram os cenários sem retirada de pontos, os valores de %*BIAS* assumem valores positivos e negativos para a área menor, enquanto que para a área maior todos os resultados deste parâmetro são positivos. Em outras palavras, isto significa que as áreas sintéticas geradas para a área maior são quase sempre maiores do que a área original de 16.127.548 m² na cota 875 m (embora próximas desta, já que o %*BIAS* máximo praticamente não passa de 0,6%). Este resultado deve estar ligado à maior irregularidade do contorno das áreas sintéticas, tendo em vista que não foram considerados ruídos correlacionados. De todo modo, sugere-se que investigações posteriores analisem melhor este fenômeno. Para a área maior, a ordem de grandeza dos valores de %*BIAS* e %*RMSE* estão ligadas à porcentagem de retirada de pontos. Para verificar este efeito, nota-se na Figura 3, à esquerda, que, para a área maior, os valores de %*RMSE* e %*BIAS* estão próximos de 2,4% no cenário com 50% de pontos retirados e em torno de 1,5% para o cenário com 90% de pontos retirados. Estes valores são da mesma ordem de grandeza dos erros em relação à área original apresentados na Tabela 2: 0,203% (~2%) e 0,128% (~1,3%), respectivamente para 50% e 90% de pontos retirados. Os valores de %*RMSE* e %*BIAS* são bastante sensíveis à inserção de ruídos altimétricos (*z*). Para verificar isto, note-se que os valores de %*RMSE* e %*BIAS* para os cenários 4, 8, 12 e 16, que consideram ruído *z* igual a zero, são menores que aqueles dos cenários subsequentes, que apresentam o mesmo ruído planimétrico, mas com ruído *z* maior que zero. Este efeito pode ser notado com maior facilidade nos “vales” das curvas da Figura 2, correspondentes aos cenários com *z*=0. Para a área menor, os valores de %*RMSE* aumentam de maneira consistente tanto com os ruídos altimétricos como com os ruídos planimétricos. Isto pode ser verificado pelo aumento do %*RMSE* nos gráficos à direita das Figuras 3 e 4. Estes gráficos também mostram que maiores diminuições de pontos representam aumentos no %*RMSE*. Os valores do %*BIAS* para a área menor tendem a aumentar com o aumento tanto do ruído altimétrico quanto com o ruído planimétrico, o que pode ser verificado nos gráficos à direita das Figuras 3 e 4.

CONCLUSÕES: O principal objetivo do artigo foi apresentar uma metodologia para a análise da precisão no cálculo de áreas planas por perfilamento laser, através de simulação Monte Carlo. As análises efetuadas mostraram que o cálculo da área maior é bem menos sensível aos erros causados por observações imprecisas do que o correspondente cálculo da área menor, tendo em vista que os valores de %*RMSE* e %*BIAS* resultaram consistentemente menores para a área maior que os seus correspondentes para área menor. Há, contudo, que se ter cuidado ao extrapolar os resultados obtidos neste estudo para outros locais. As duas áreas analisadas se encontram em terrenos ondulado e acidentado, tendendo a apresentar resultados mais satisfatórios em relação a erros de observação do que em áreas em terrenos mais suaves. A partir disto, e também para melhor avaliar a metodologia proposta, sugere-se que novos estudos analisem os critérios e resultados obtidos no presente trabalho.

REFERÊNCIAS:

- BOURKE, Paul. Efficient Triangulation Algorithm Suitable for Terrain Modelling or An Algorithm for Interpolating Irregularly-Spaced Data with Applications in Terrain Modelling. **3rd Pan Pacific Computer Conference**. Pequim, China, 1989. Disponível em: <<http://paulbourke.net/papers/triangulate/>>.
- MULLER, F.; SILVA, A.R.; BERTOL, R.E.; KRAEMER, S.M. Precisão no cálculo de áreas planas por perfilamento a LASER 1: quantidade de pontos por m² para a geração do MDT. Trabalho enviado para publicação no **VII GEONORDESTE**. Aracaju, 2014.
- WECHSLER, S. P., July 1999. Digital elevation model (DEM) uncertainty: Evaluation and effect on topographic parameters. In: **ESRI User Conference 1999 Proceedings**. San Diego, CA, 1999. Disponível em: <<http://www.gis.usu.edu/docs/protected/procs/esri/1999/PROCEED/abstracts/a262.htm>>.