

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

Pedro Henrique Araújo Almeida

**INFLUÊNCIA DA DENSIDADE AMSTRAL NA EXATIDÃO DA KRIGAGEM EM
MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO**

VIÇOSA – MINAS GERAIS

2016

Pedro Henrique Araújo Almeida

**INFLUÊNCIA DA DENSIDADE AMOSTRAL NA EXATIDÃO DA KRIGAGEM EM
MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO**

**Trabalho de conclusão de curso apresentado
à Universidade Federal de Viçosa como parte
das exigências para a obtenção do título de
Engenheiro Agrônomo. Modalidade: trabalho
científico.**

Orientador: Márcio Rocha Francelino

**Coorientadores: Elpídio Inácio Fernandes
Filho**

Adriano Luis Schünemann

VIÇOSA – MINAS GERAIS

2016

Pedro Henrique Araújo Almeida

**INFLUÊNCIA DA DENSIDADE AMOSTRAL NA EXATIDÃO DA KRIGAGEM EM
MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO**

**Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade Federal de Viçosa como parte das
exigências para a obtenção do título de Engenheiro
Agrônomo. Modalidade: trabalho científico.**

APROVADO: 23/11/2016.

Prof. Márcio Rocha Francelino
(orientador)
(UFV)

***Dedico ao povo brasileiro por proporcionar
à todos um ensino superior de qualidade***

AGRADECIMENTOS

Ao co orientador e amigo Adriano Luis Schünemann, pelos ensinamentos e por ter contribuído diretamente com o trabalho de campo e processamento dos dados dessa pesquisa.

Ao orientador e amigo Márcio Rocha Francelino pela amizade e pelas diversas oportunidades de trabalho e aprendizagem.

Ao co orientador e amigo Elpídio Inácio Fernandes Filho por abrir as portas do Labgeo e por todo o ensinamento ao longo desses anos de trabalho.

À todos os amigos Antárticos, em especial aos pesquisadores André Thomazini e Antônio Batista Pereira pelo companheirismo e auxílio nos trabalhos de campo durante as Operações Antárticas XXXIII e XXXIV.

Aos amigos do Labgeo pela amizade e troca de conhecimento.

Ao INCT-Criosfera, na pessoa do professor Carlos Ernesto Schaefer, pela oportunidade de participar das Operações Antárticas XXXIII e XXXIV e pela bolsa de iniciação científica concedida.

À Marinha do Brasil pelo apoio logístico durante os trabalhos de campo.

A todos os professores e técnicos da Universidade Federal de Viçosa pelo trabalho sério prestado ao curso de Agronomia desta instituição.

Aos familiares pelos ensinamentos e pelos conselhos.

À minha amiga e companheira Raíssa R. Almeida pelo carinho e amizade.

Aos amigos da República Sítio Boa Fé e República Estância pela amizade durante esses anos de Viçosa.

Ao Projeto Geoespaço, pelos dados da base GPS situados na Península Keller.

RESUMO

Para os diversos estudos com fins de planejamento territorial, ambiental ou de exploração mineral, é necessária a confecção de uma base cartográfica para representação de superfícies que confira exatidão suficiente para tomadas de decisão. Um modelo pode ser elaborado utilizando ferramentas computacionais baseadas em princípios espaciais, tais como a transformação de dados pontuais de elevação em formatos contínuos, denominados Modelos Digitais de Elevação (MDEs). A importância desses MDEs para estudos ambientais está no fato destes fornecerem as variáveis do terreno permitindo análises diversas, tais como declividade e face de exposição solar. A qualidade desses modelos está diretamente relacionada ao procedimento de coleta desses dados e seu detalhamento em campo. Tendo em vista essa relação, os objetivos desse trabalho foram (i) avaliar a influência de diferentes grades amostrais e densidades de pontos, na elaboração de modelo digital de elevação, (ii) além do tempo gasto e o custo do trabalho de campo para elaborar MDEs. A base de dados foi obtida através de levantamento topográfico de alta resolução, utilizando laser scanner terrestre. Utilizou-se o software R Studio para obtenção dos grids amostrais, com os formatos Hexagonal, Quadrática e Aleatória, nas densidades de pontos de 0,30; 0,61; 0,91; 1,22; 1,52; 2,28; 3,04 e 4,56 pontos/ha, para a área de 329,15 ha da Península Coppermine, localizada na Ilha Robert, parte do arquipélago das Shetlands do Sul, Antártica Marítima. O presente trabalho demonstra que uma maior densidade de pontos proporcionará maior qualidade do modelo, com valores menores de RMSE. Para os diferentes grids amostrais, obteve-se um melhor ajuste do modelo de grades regulares, quando comparadas ao formato aleatório. Os custos relativos aos trabalhos de campo estão diretamente relacionados ao maior número de pontos coletados. Porém em grids com maior densidade, o ganho de RMSE não foi proporcional ao custo, ocorrendo um aumento expressivo deste. Esses resultados, no entanto, foram obtidos para uma área de relevo suave ondulado. Dessa forma, são necessários estudos complementares em áreas que apresentem classes de relevo com declividades superiores.

Palavras chave: Topografia, interpoladores, grades amostrais

ABSTRACT

For the various studies concerning the territorial, environmental or mineral exploration planning, it is necessary to create a cartographic base for surface representation that confers sufficient accuracy for decision making. A model can be constructed using computational tools based on spatial principles, such as the transformation of punctual elevation data into continuous formats, called Digital Elevation Models (MDEs). The importance of these MDEs for environmental studies lies in the fact that they provide co-variables of the terrain allowing diverse analyzes, such as slope and face of sun exposure. The quality of these models is directly related to the procedure of collecting these data and their detail in the field. Considering this relationship, the objectives of this work were (i) to evaluate the influence of different sample grids and point densities in the elaboration of a digital elevation model, (ii) the time spent and the cost of field work to elaborate MDEs. The database was obtained through high resolution topographic survey, using the terrestrial laser scanner. The R Studio software was used to obtain the sample grids, with the Hexagonal, Quadratic and Random formats, at point densities of 0.30; 0.61; 0.91; 1.22; 1.52; 2.28; 3.04 and 4.56 points / ha for the 329.15 ha area of the Coppermine Peninsula, located on Robert Island, part of the South Shetlands archipelago, Maritime Antarctic. The present work shows that a higher density of points will provide higher quality of the model, with lower RMSE values. For the different sample grids, a better adjustment of the regular grids model was obtained when compared to the random format. The costs related to the field work are directly related to the highest number of points collected, but there is a limit on the RMSE gain, with a significant cost increase. These results, however, were obtained for a smooth undulating relief area. In this way, complementary studies are required in areas that show relief classes with higher slopes.

Key words: Topography, interpolation, sample grids

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO	9
2 - MATERIAL E MÉTODOS.....	13
2.1 - Caracterização da área de estudo	13
2.2 - Coleta de dados georreferenciados	14
2.3 - Levantamento de elevada resolução topográfica (LERT)	14
2.4 - Pós processamento dos dados do GPS e LERT	15
2.4.1 - Transporte de coordenadas e correção diferencial.....	15
2.4.2 - Integração da nuvem de pontos	16
2.4.3 - Tratamento da nuvem de pontos	16
2.5 - Geração do Modelo Digital de Elevação- MDE base.....	17
2.6 - Geoestatística: obtenção dos grids amostrais e interpolações	17
3 -RESULTADOS E DISCUSSÃO	21
3.1 - Densidades de pontos e Norma NBR 13.133/94	26
3.2 - Análise do RMSE: nº de horas trabalhadas e custos.....	27
3.4 - Modelo Digital de Elevação de alta resolução da Península Coppermine	29
4 - CONCLUSÃO	31
5 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32

1 - INTRODUÇÃO

Para os diversos estudos com fins de planejamento territorial, ambiental ou de exploração mineral, é necessária a confecção de uma base cartográfica para representação de superfícies que confira exatidão suficiente para tomadas de decisão. Essa exatidão pode ser afetada pelos erros presentes nos equipamentos utilizados ou ainda pela densidade da coleta dos dados. Os custos de levantamentos de campo estão diretamente relacionados à restrição da coleta de um grande volume de dados, sendo estes elevados ao se trabalhar em grandes áreas com acesso dificultado ou em escalas de mapeamento a nível detalhado.

Na busca de modelos que aproximam da realidade de campo, diversos pesquisadores recorrem a ferramentas de Geoestatística aplicadas a Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Essa integração da estatística espacial aos SIGs, permite mensurar a variabilidade espacial das propriedades e fenômenos estudados, com hipóteses mais próximas dos fenômenos ambientais, permitindo quantificar os erros presentes nos modelos (INPE, 1999). A Geoestatística considera que fenômenos possuem valores semelhantes quanto maior for sua proximidade no espaço, ou seja, parte-se da premissa que existe uma dependência espacial dos dados. A partir disso, aplica-se um conjunto de ferramentas computacionais para o estabelecimento de funções de correlação espacial (Archela et al, 2013). Para Santos (2008):

"...a dependência espacial pode ser observada quando a magnitude de um valor observado em um ponto tende a ser a mesma, a de um valor observado em um ponto próximo".

Para realizar estimativas de valores não amostrados utilizam-se diversos interpoladores. Um exemplo é a Krigagem, que de acordo com Cianci (2006), é um método de interpolação que permite estimar um valor em determinado ponto. A Krigagem leva em consideração a continuidade existente entre valores de pontos amostrados próximos, considerando também a interferência da distância entre os pontos amostrados (Santos, 2008). A partir da correlação espacial entre estes pontos, obtêm-se o variograma. Através dessa ferramenta, é possível quantificar a variação no espaço de um fenômeno regionalizado, resumindo a continuidade

especial entre pares de pontos (Archela et al., 2013). Portanto, para que um bom modelo seja construído é necessário que a coleta dos dados seja mais representativa possível e de menor custo. Para isso a escolha do padrão de amostragem e densidade amostral devem ser levados em consideração para as diferentes áreas trabalhadas.

A amostragem para estudo de uma área baseia-se em obter porções representativas da mesma para caracterizar um todo, sendo um importante fator que pode influenciar na exatidão de um modelo, observando-se além da densidade, o tipo de grade de coleta de pontos. Essa grade pode ser regular, podendo-se variar distância entre os pontos e a conformação espacial dos mesmos; ou grade irregular, também conhecida como amostragem aleatória (INPE, 2016). A escolha do tipo de grade amostral se dá a partir dos recursos disponíveis ao usuário, como acesso aos pontos e recursos para logísticas de trabalho de campo e processamento das amostras.

Estudos relacionando o tamanho de grade amostral e disposição espacial vem sendo desenvolvidos por pesquisadores da área de geociências, com aplicações na agricultura e estudos geológicos. Ferreira (2015) investigou a redução do adensamento amostral na determinação de atributos físicos do solo, obtendo-se parâmetros do modelo do semivariograma similares aos da base de dados original, quando reduziu-se a densidade amostral regular em 50%. Coelho et al. (2009) avaliaram a influência de densidade amostral e interpoladores em produtividade de soja, utilizando a krigagem como interpolador, concluindo que a maior densidade de pontos influencia na construção de um bom semivariograma. Uma outra aplicação desses interpoladores, está na representação de relevos, com a elaboração de Modelos Digitais de Elevação (MDEs), utilizando-se dados de elevação obtidos em campo.

Para o levantamento de dados de elevação, pode-se utilizar equipamentos topográficos convencionais como estações totais, GPS topográficos, além de restituições fotogramétricas e técnicas de sensoriamento remoto. Com o advento de novas tecnologias como o Laser scanner, técnica também conhecida como LIDAR (*Light Detection And Ranging*), é possível extrapolar os levantamentos para grandes áreas com uma grande quantidade de dados. Esse sistema pode ser

aerotransportado (dinâmico), exigindo alto investimento de operação. Essa tecnologia também está presente para uso terrestre (estático), com equipamentos menores e compactos, com o mesmo nível de tecnologia e alto investimento de compra. Porém, destaca-se a vantagem de ser de baixo custo operacional, proporcionando usos desde a esfera industrial, ao se modelar peças e equipamentos, à levantamentos de grandes áreas, como exemplo áreas de mineração.

De acordo com Schäfer e Loch (2005), o LIDAR é um sistema de sensoriamento remoto ativo, que utiliza pulsos laser para a coleta de informações. Para equipamentos estáticos, este conjunto ótico está suportado por sistema mecânico de varredura automatizado, com rotações angulares na horizontal de 360° e até 140° na vertical. O sistema de funcionamento está baseado na emissão de um feixe de laser auxiliado por um espelho de varredura, permitindo determinar a distância entre o sensor e o objeto através do intervalo de tempo entre a emissão e recepção do pulso laser, com aquisição de dados tridimensionais (Galvanin e Dal Poz, 2015) na forma de nuvem de pontos.

Os dados obtidos por laser scanner apresentam uma alta densidade de pontos, permitindo obtenção de Modelo Digital de Elevação (MDE) com resolução espacial ultra-detalhada após o processo de interpolação. A importância do MDE para estudos ambientais, encontra-se no fato de o mesmo possibilitar a extração de diversas variáveis do terreno, tais como: face de exposição, declividade e drenagem, permitindo estudos atuais e futuros.

Para Chagas et al. (2010), erros de modelagem são inevitáveis, pois MDEs passam por processos de generalizações e interpolações. A interpolação de locais onde não obteve-se os dados de altitude, é um procedimento que pode diminuir a qualidade de um MDE, pois quanto menor densidade de pontos mais difícil será obter um modelo próximo da realidade, com alta exatidão. O método para avaliação da qualidade de um MDE baseia-se na confrontação de um conjunto de pontos conhecidos, com um conjunto de dados obtidos independente do levantamento realizado. O grau de concordância entre esses pontos é calculado de acordo com a raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSE) da elevação (Chagas et al, 2010).

A densidade amostral e, sobretudo padrão de distribuição amostral, afeta a qualidade de MDEs e são objetos de pesquisas recentes, com pouca literatura a respeito deste tema. Dessa forma, existe a necessidade de estudos afim de buscar informações a nível de campo para determinação de grades amostrais, de modo que possam permitir melhorias no planejamento prévio, permitindo reduções nos custos finais de projetos.

Neste contexto, os objetivos desse trabalho foram (i) avaliar a influência de diferentes grades amostrais e densidades de pontos, na elaboração de modelo digital de elevação, (ii) além do tempo gasto e o custo do trabalho de campo para elaborar MDEs.

2 - MATERIAL E MÉTODOS

2.1 - Caracterização da área de estudo

O estudo foi realizado na Península Coppermine (Figura 1), Ilha Robert, Antártica Marítima (62°22'05" - 62°23'27" S e 59°40'47" - 59°43'35" W - WGS 84) durante verão austral de 2015/2016, durante a XXXIV Operação Antártica Brasileira. Como parte da logística dos trabalhos, os pesquisadores instalaram acampamento no Refúgio Chileno Rizzo Patron.

De acordo com Paula (2015), a Península Coppermine possui características naturais que a enquadram como Área Antártica Especialmente Protegida (AAEP), sendo formada por terraços marinhos e rochas ígneas vulcânicas, contemplada com uma ampla gama de comunidades vegetais associadas com a fauna de invertebrados e vertebrados.

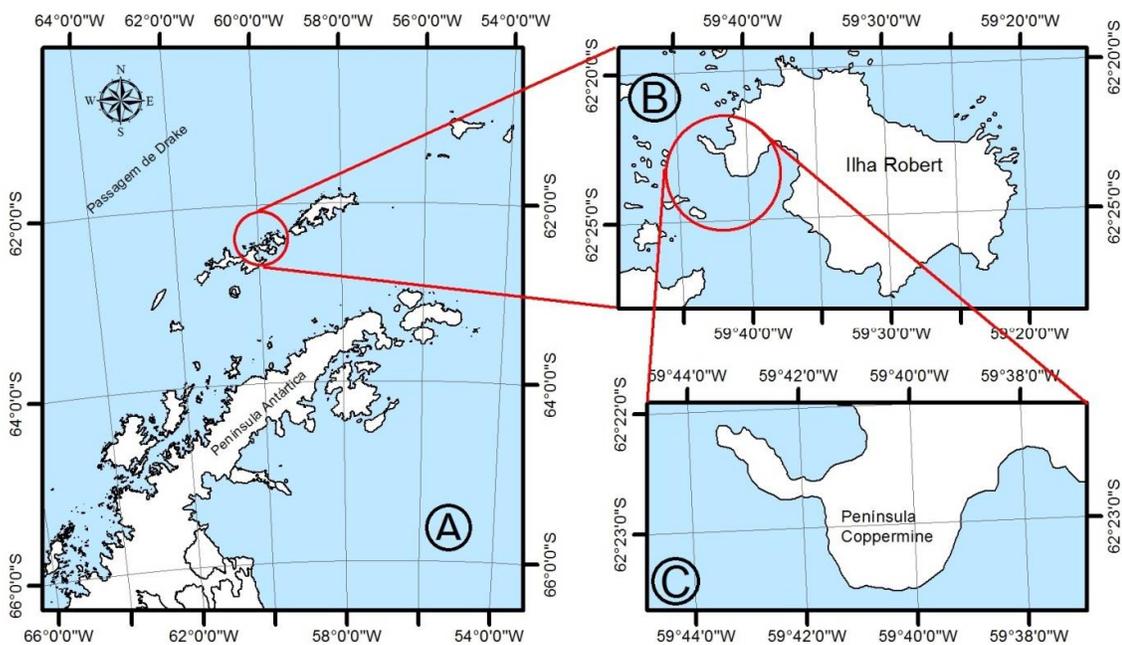


Figura 1 - Localização da área de estudo – (A) Ilhas Shetlands do Sul e Península Antártica; (B) Ilha Robert e (C) Península Coppermine.

2.2 - Coleta de dados georreferenciados

Para a coleta das coordenadas de todos os pontos rastreados, utilizou-se o método diferencial de rastreamento, sendo necessária uma base que ficou instalada em um tripé de alumínio, centrado o equipamento em um marco que já se encontrava no local. O receptor utilizado foi o GNSS da Leica Modelo GS08 Plus. Para a coleta dos pontos das estações de varredura foi utilizado outro receptor do mesmo modelo denominado como Rover. Para o transporte de coordenadas do GPS Base utilizou-se o receptor GNSS localizado na EACF, operado pelo projeto Geoespaço (INPE).

2.3 - Levantamento de elevada resolução topográfica (LERT)

Para realizar a varredura da nuvem de pontos, utilizou-se Laserscanner da empresa Riegl, modelo VZ 1000(Figura 2), o qual apresenta capacidade de realizar a varredura em diferentes densidades de pontos. Para este trabalho foi utilizada a configuração do equipamento com alcance de 1400 metros e tempo médio de 10 minutos em cada varredura. Na escolha dos locais de instalação do equipamento, foram observados pontos onde houvesse no mínimo 60% de sobreposição entre varreduras, conforme orientação do fabricante, sendo necessários 40 locais espalhados ao longo da península, conforme apresentado na Figura 3.



Figura 2 - Conjunto Laser scanner terrestre e receptor GNSS. Ao fundo geleira limite da área de estudo.

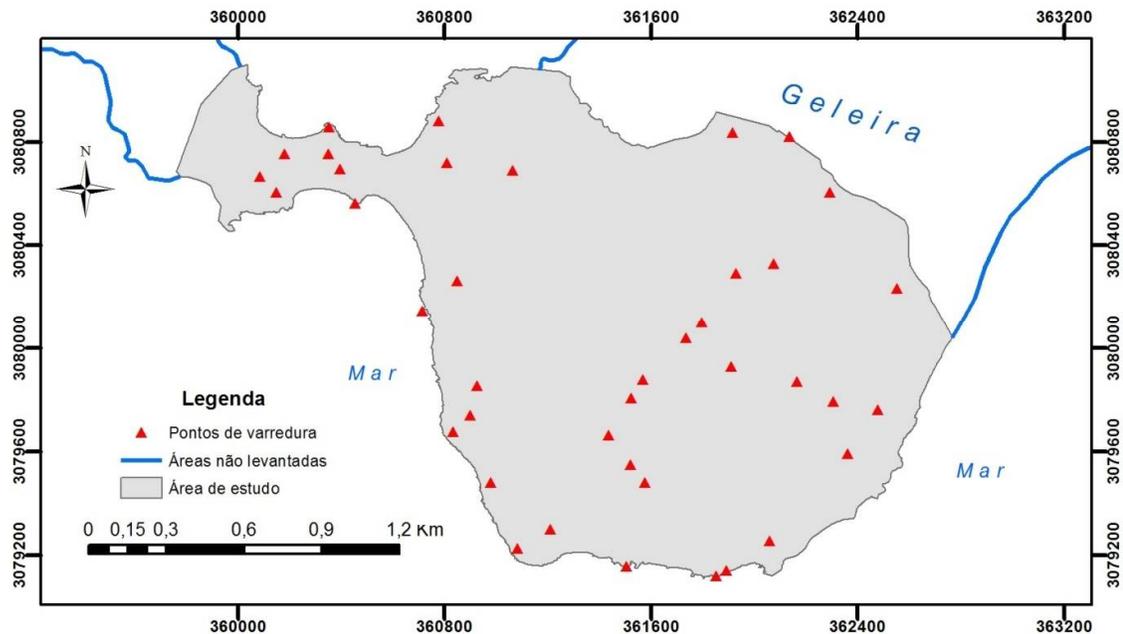


Figura 3 - Área de estudo com pontos de varredura - Projeção: UTM, Datum WGS 84 - 21S.

2.4 - Pós processamento dos dados do GPS e LERT

2.4.1 - Transporte de coordenadas e correção diferencial

O pós-processamento foi realizado no Laboratório de Geoprocessamento do Departamento de Solos, Universidade Federal de Viçosa. O processamento teve início através da correção dos pontos coletados com o receptor GNSS, utilizando o software Leica Geoffice versão 8.3.0. Para o transporte de coordenadas do GNSS base, utilizou-se os dados do receptor GNSS instalado próximo à Estação Antártica Comandante Ferraz na Península Keller, Ilha Rei George, operado pelo Projeto Geoespaço (INPE).

Após a correção do receptor base, foi realizada a correção diferencial do receptor utilizado para georreferenciar as estações de varredura. Os erros de processamento foram computados posteriormente. Em cada ponto o receptor coletou a altitude elipsoidal, sendo necessário o ajuste para altitude geoidal. Para isso utilizou-se o modelo geoidal EGM96, obtendo-se a diferença para cada ponto.

Foi calculada a média dos pontos obtendo-se a diferença de -21,113 m entre o modelo geoidal e elipsoidal.

2.4.2 - Integração da nuvem de pontos

Para o processamento da nuvem de pontos, utilizou-se o software RiscanPro versão 2.0 da empresa Rieghl. Após a obtenção dos dados, a primeira operação executada foi inserir as coordenadas das estações, através de tabela confeccionada em planilha eletrônica, com as colunas: nome do ponto, coordenada x, coordenada y e coordenada z.

A partir da obtenção das nuvens de pontos georreferenciadas, foi possível visualizar quais estações de varredura eram próximas e possuíam uma maior sobreposição de pontos. Para a integração das nuvens foi utilizado o ajuste automático do software. Esse ajuste pode ser realizado entre duas nuvens distintas ou mais, sendo tomada uma como referência para o ajuste dos eixos, considerando apenas *roll*, *pitch* e *yaw*. É recomendado pela fabricante o ajuste de pontos até apresentar o desvio padrão do erro igual ou menor de 0,03 m.

2.4.3 - Tratamento da nuvem de pontos

Após o ajuste das nuvens de pontos foi realizou-se a filtragem, operação de remoção de pontos indesejados tais como: vegetações, objetos, pontos abaixo da terra, e principalmente pontos de spray marinho, devido à configuração do aparelho, que foi operado em modo de alta sensibilidade. Essa configuração foi escolhida devido ao fato da área apresentar bancos de neve, ocorrendo o espalhamento do sinal laser pelas partículas de gelo quando trabalhado no modo de sensibilidade baixa.

Todas as nuvens de pontos foram unidas através do comando Export Polydata, a partir da seleção de todos os pontos. Posteriormente reduziu-se a densidade da nuvem de pontos, através do comando Octree, gerando uma grade de pontos regular de 0,5 m, e posteriormente exportada no formato LAS, o qual é um formato binário padrão da indústria para armazenamento de dados LIDAR (ESRI 2016).

2.5 - Geração do Modelo Digital de Elevação- MDE base

No software Arcmap 10.2, o arquivo LAS foi transformado em um LAS dataset, e posteriormente em formato matricial, através do comando LAS dataset to raster. Para utilização dos dados no software R, realizou-se a transformação do formato de Grid para o formato Asc. Como o receptor GNSS coletou a altitude elipsoidal, foi necessário o ajuste para altitude geoidal. Para isso utilizou-se o modelo EGM96, obtendo-se a diferença média dos pontos. Foi utilizado a ferramenta *Raster calculator*, que utiliza álgebra de mapas para ajustar o raster para o modelo geoidal de altitude, onde a mesma foi alterada a partir da subtração de 21,113 m.

2.6 - Geoestatística: obtenção dos grids amostrais e interpolações

No software R, foi elaborado um script para realizar a amostragem dos grids de pontos. Foram gerados grids amostrais nos formatos Hexagonal, Quadrática e Aleatória. Para cada conjunto amostral de pontos foi gerado um arquivo no formato csv. Em cada um dos padrões foram realizadas 20 repetições, com a densidade de 0,30; 0,61; 0,91; 1,22; 1,52; 2,28; 3,04 e 4,56 pontos/ha. As figuras 4, 5 e 6 apresentam os exemplos de amostragens. Para a avaliação da influência da densidade amostral na modelagem, utilizou-se o RMSE geral, obtidos através dos 480 conjuntos amostrais, conforme Tabela 1.

Tabela 1. Processamentos realizados - Total de 480 conjuntos amostrais

Padrão de amostragem	Repetições	Densidades	Total
Hexagonal (KU e KO)	20	8	160
Quadratica (KU e KO)	20	8	160
Aleatória (KU e KO)	20	8	160
Total	60	24	480

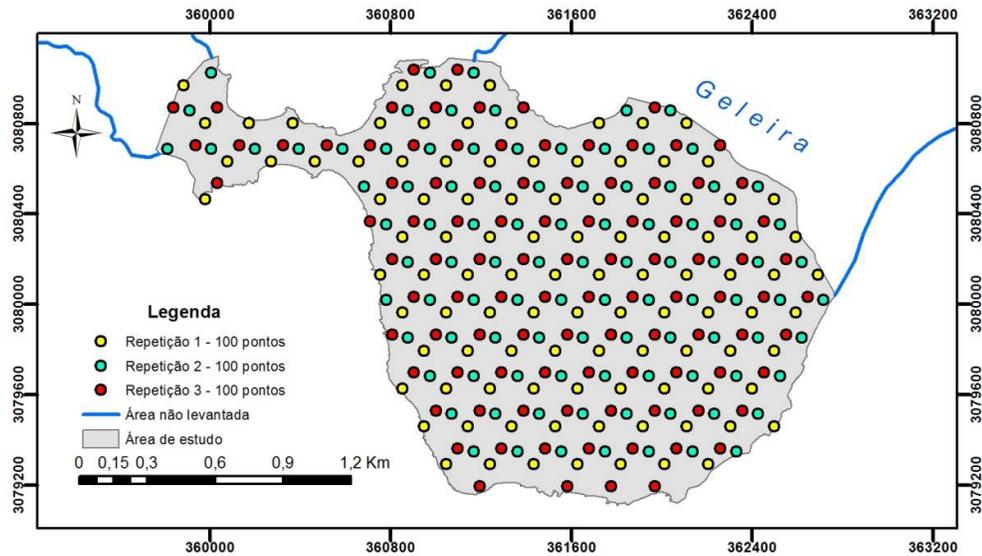


Figura 4 - Grade Hexagonal. Padrão de coleta regular, sendo representadas 3 dos 20 conjuntos amostrais para a grade de coleta de 0,30 pontos/ha.

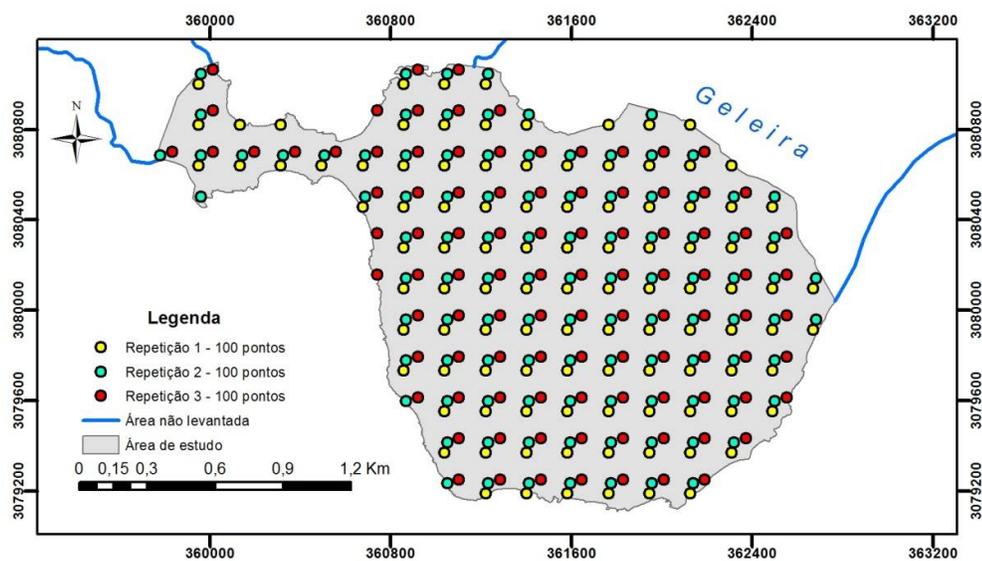


Figura 5 - Grade Quadrática - 100 pontos. Padrão de coleta regular, sendo representadas 3 dos 20 conjuntos amostrais para a grade de coleta de 0,30 pontos/ha.

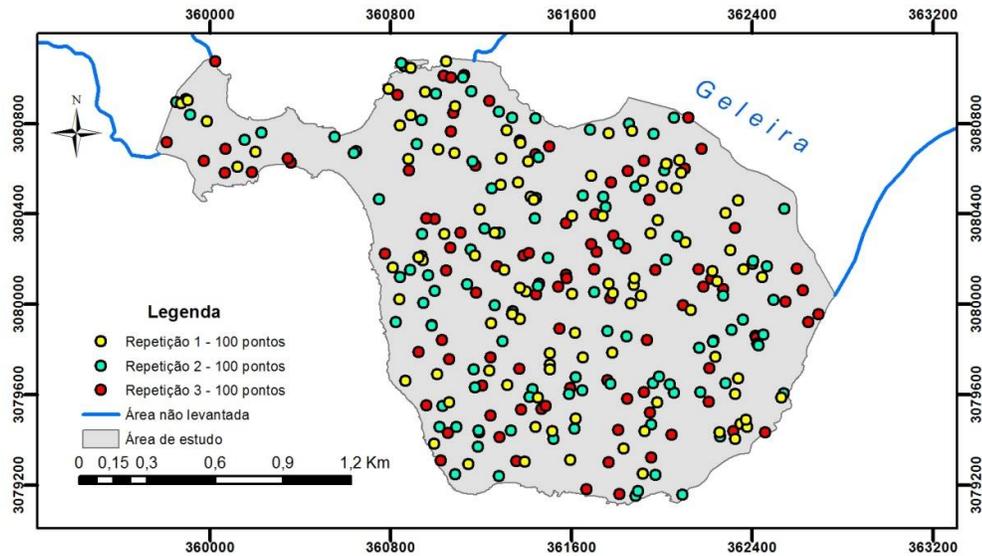


Figura 6 - Grade Aleatória - 100 pontos. Padrão de coleta irregular, sendo representadas 3 dos 20 conjuntos amostrais para a grade de coleta de 0,30 pontos/ha.

No software R, foi elaborado outro script para gerar os modelos digitais de elevação utilizando o método de Krigagem, utilizando-se para isso o pacote denominado Automap desenvolvido por Hiemstra (2009).

Para a análise qualitativa da modelagem, obteve-se o RMSE através do algoritmo de krigagem, utilizando a validação cruzada (leave-one-out). Para automatizar o processamento, foi inserido o comando FOR no script, que realiza o processamento de modo automático para as diferentes densidades e formatos de grids amostrais. Foi elaborado outro script no software R, para gerar os gráficos dos resultados da krigagem. Para o cálculo do RMSE foi utilizada a equação de acordo com Willmottw e Matsuura (2005).

$$RMSE = \left[n^{-1} \sum_{i=1}^n |e_i|^2 \right]^{1/2}, \text{ onde:}$$

RMSE = raiz quadrada do erro médio quadrático, em m;

e_i = cada diferença entre os valores de elevação preditos e os valores originais do MDE de referência, em m.

Para as análises gráficas, considerou-se uma linha de corte correspondente a 95% de variação dos dados, de acordo com Olea (1999). O valor de corte calculado para esse presente caso, foi de 3,22 metros.

3 -RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos representados na Tabela 02 apresentam as menores distâncias (m) entre os pontos em função das densidades amostrais, para a área obtida de 329,1470 ha.

Tabela 2. Menor distância entre pontos em função da densidade amostral. Adaptada de Schunemman (2016).

		Densidades (pontos/ha)							
Medidas	Padrão	0,30	0,61	0,91	1,22	1,52	2,28	3,04	4,56
	Amostral								
Pontos		100	200	300	400	500	750	1000	1500
Menor distância	Hexagonal	193,6	137,5	112,5	97,3	87,1	71,1	61,6	50,3
	Quadrada	181,4	128,2	104,7	90,7	81,1	66,2	57,3	46,8
	Aleatória	13,9	11,4	8,3	6,0	4,4	7,2	5,0	4,1

Para as grades que apresentam formato regular, a redução dos valores possui um padrão na redução da distância. A grade aleatória não apresentou o mesmo comportamento, pois sua distribuição é ao acaso, sem padrões espaciais definidos.

Como citado anteriormente, a menor distância entre pares de pontos tem grande importância para modelos geoestatísticos, pois influencia diretamente no melhor ajuste do semivariograma do modelo, o que leva a ganhos de qualidade do produto final, como observado por Ferreira (2015).

Analisando a redução do RMSE considerando as 480 repetições, observa-se que com o aumento da densidade de pontos, ocorre uma redução considerável da variância dos dados. Essa redução tem o impacto direto na melhoria do RMSE. A linha de corte segundo Olea (1999), foi alcançada aproximadamente com 1200 pontos, conforme Figura 7.

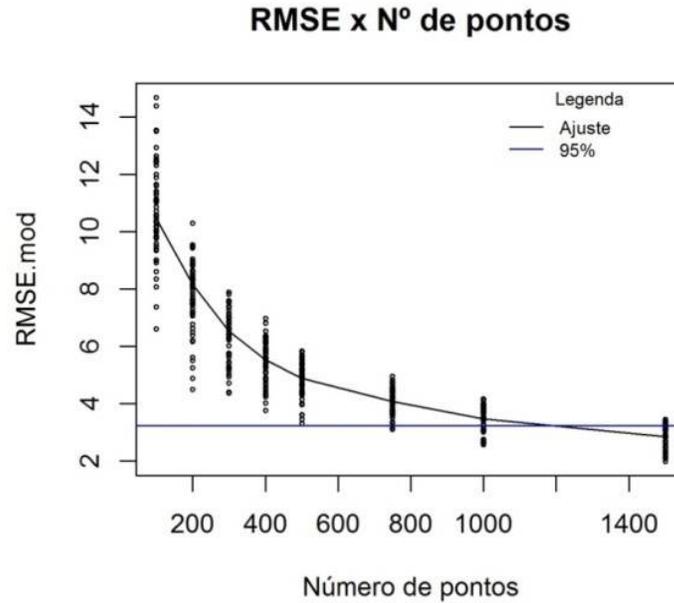


Figura 7 - Curva de redução do RMSE influenciada pelo aumento da densidade amostral. Alcance da linha de acordo com Olea (1999) com 1200 pontos.

Analisando os padrões amostrais separadamente, pode-se notar que ocorre diferenças entre elas em relação ao ganho de RMSE. As grades com formatos regulares apresentaram menores valores de RMSE, comparadas à grade aleatória. Esse resultado pode ser explicado pela maior variância dos dados na grade aleatória. Para esse padrão espacial, pode ocorrer pontos muito próximos tais como pontos muito distantes entre si, o que leva a uma grande variância entre as repetições.

Conforme Figuras 8 e 9, a grade hexagonal apresentou maior variância para densidades menores comparada a grade quadrática, porém apresentou comportamento diferente para amostragens mais densas, com menor variância dos dados. Essa diferença pode ser explicada pelo aumento da densidade de pontos, pois a grade hexagonal apresenta em seus pontos norte e sul, maior distância entre pontos. Para a grade quadrática a distância é única para todos os pontos, para determinada densidade amostral.

Comparando-se a curva de redução de RMSE, a grade Hexagonal foi a que apresentou melhor comportamento, comparando densidades de pontos menores. Para as maiores densidades, o comportamento da Grade hexagonal foi semelhante à Grade quadrática, sendo que em ambas a linha de corte foi alcançada com aproximadamente 1300 pontos.

A grade aleatória apresentou maiores valores de RMSE, tanto para densidades menores, quanto para densidades maiores, alcançando a linha de corte apenas com 1500 pontos, conforme Figura 10.

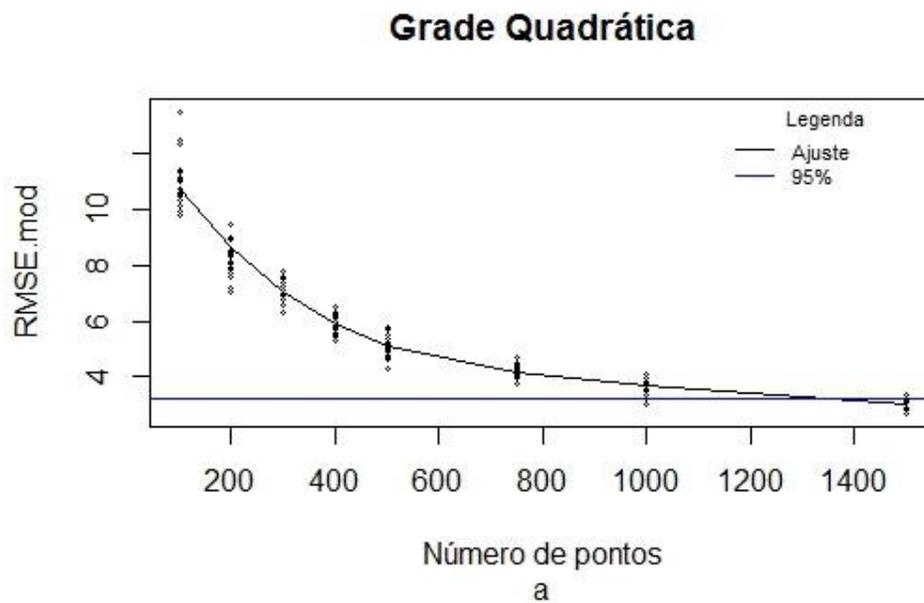


Figura 8 - Grade quadrática x densidade de pontos. Alcance da linha de corte com aproximadamente 1300 pontos.

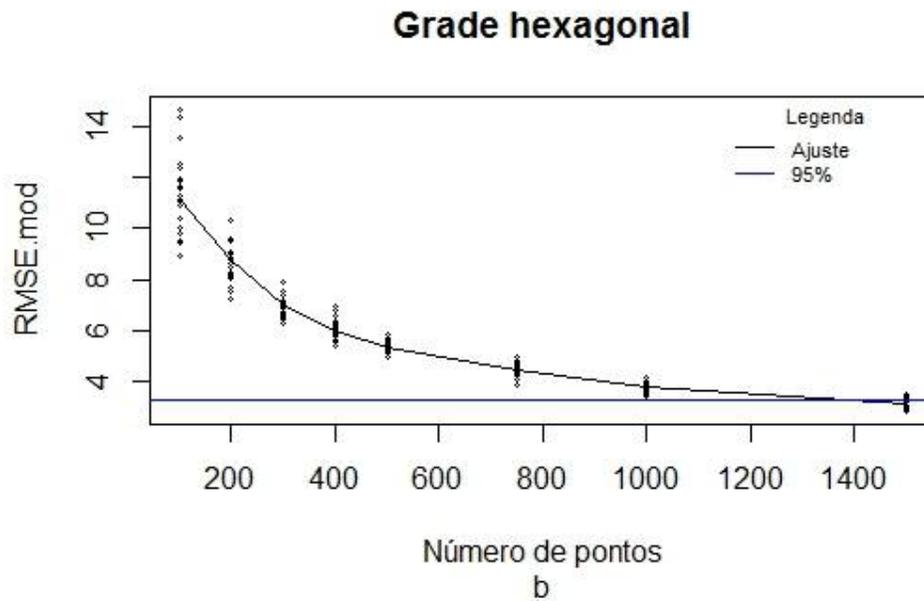


Figura 9 - Grade hexagonal x densidade de pontos. Alcance da linha de corte com aproximadamente 1300 pontos.

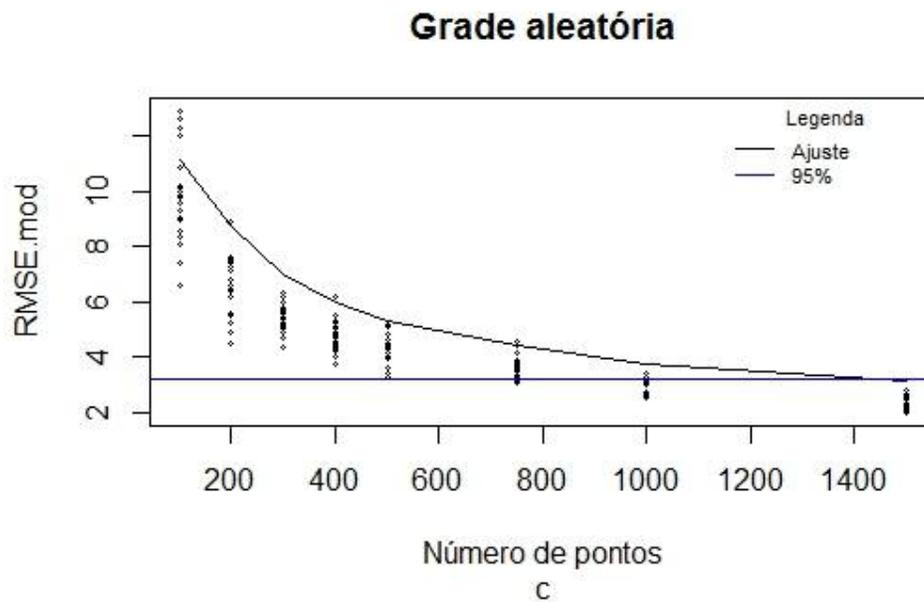


Figura 10 - Grade aleatória x densidade de pontos. Alcance da linha de corte com aproximadamente 1500 pontos.

MDEs e curvas de nível - três padrões estudados e duas densidades amostrais

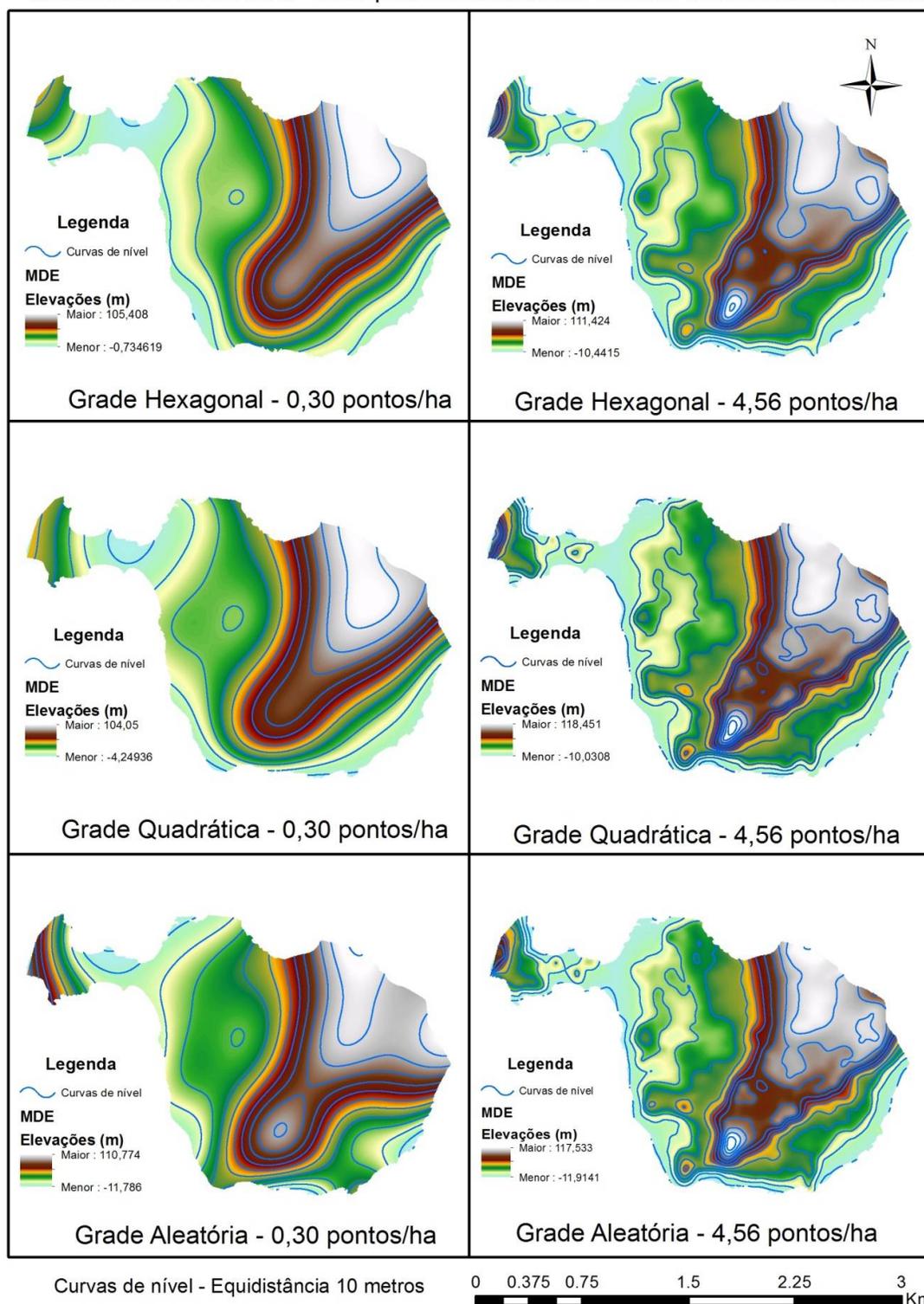


Figura 11 - Modelos Digitais de Elevação da Península Coppermine, gerados pela Krigagem para os três padrões amostrais e duas densidades. Representação da repetição nº1 para cada padrão amostral.

3.1 - Densidades de pontos e Norma NBR 13.133/94

A norma NBR 13.133/94 que regulamenta a execução de levantamentos topográficos, classifica em oito classes levantamentos planialtimétricos de áreas, abrangendo métodos de medição, escalas de desenho, equidistâncias de curvas de nível e densidade mínima de pontos a serem medidos. A Tabela 3 apresenta a relação da escala de pontos e densidades mínima de pontos a serem medidos em campo para levantamento topográfico planialtimétrico.

Tabela 3 - Fonte: NBR 13.333/94, adaptada. Densidade mínima de pontos por escala

Escala do desenho	Equidistância das curvas de nível (m)	Densidade mínima de pontos/ha para terrenos com diferentes declividades		
		Acima de 20%	Entre 10 e 20%	Até 10%
1:5000	5	4	3	2
1:2000	2	10	7	5
1:1000	1	32	25	18
1:500	1	45	30	20

Pode-se observar na Tabela 3, que as densidades de pontos dos grids de 2,28 3,04 e 4,56 conforme Tabela 2, enquadraram-se ao levantamento topográfico com escala de 1:5000, abrangendo áreas com topografias mais acentuadas a áreas com topografias planas. Portanto, o relevo é um fator que deve-se levar em consideração ao avaliar a densidade de pontos ideal para a área, além do objetivo do mapeamento e escala desejada conforme NBR 13.333/94. A escolha adequada para cada tipo de terreno poderá levar a ganhos de produtividade e redução de trabalho.

Para estudos ambientais na região Antártica, cartas topográficas representadas na escala de 1:5000, atendem plenamente a demanda dos pesquisadores brasileiros para trabalhos de mapeamentos de solos e estudos geomorfológicos. A Península Coppermine está classificada de acordo NBR 13.333/94 com declividade entre 10 e 20%, onde a densidade mínima de 3 pontos por ha foi obtida no grid de 1000 pontos.

Ainda de acordo com a Tabela 3 nota-se que para uma área que possui topografia com declividade abaixo de 10%, a grade de 1.500 pontos apresentou densidade próxima de levantamentos na escala de 1:2000. Assim, observa-se que um pequeno incremento da densidade de pontos coletados na área, poderá levar ao aumento significativo da escala de mapeamento.

3.2 - Análise do RMSE: nº de horas trabalhadas e custos

Para a análise de horas trabalhadas para a execução de um Levantamento Topográfico Planialtimétrico na área estudada, considerou-se de acordo com a experiência do autor que a média de produtividade de uma equipe de campo, utilizando topografia convencional seja de 500 pontos por dia trabalhado, sendo cada dia composto de 8 horas.

Levando-se em consideração que para a realização do trabalho de campo é necessária uma equipe de topografia composta de 1 técnico, 2 auxiliares, 1 estação total classe 2, demais acessórios e veículo. Considera-se o valor de R\$ 1.700,00 por dia trabalhado, de acordo com tabela preparada pela Associação das Empresas de Topografia do Estado de São Paulo (APEAESP).

Tabela 4 - Tempo necessário para a coleta de pontos dos grids estudadas e custo, utilizando topografia convencional

Grade de coleta	Horas trabalhadas	Dias trabalhados	Custo (R\$)
100	1,6	1	1700
200	3,2	1	1700
300	4,8	1	1700
400	6,4	1	1700
500	8	1	1700
750	12	1,5	2250
1000	16	2	3400
1500	24	3	5100

Através dessa tabela, nota-se que a escolha da densidade amostral irá proporcionar redução ou aumento das horas trabalhadas. Para a área estudada, considerando um mapeamento na Escala de 1:5000 para uma declividade de até

10%, o tempo de trabalho poderá ser dobrado ao optar-se por uma grade mais densa. Sendo assim, a escolha da densidade amostral é um importante fator no que diz respeito aos custos finais de um projeto, uma vez que se trata de modelagens, onde pequenos ou grandes incrementos poderão proporcionar melhorias ou não, à qualidade do modelo.

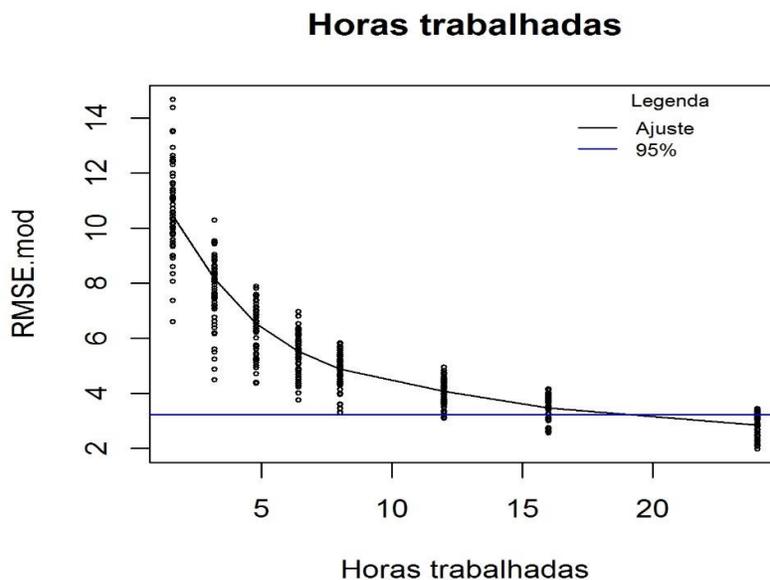


Figura 11 - Redução do RMSE em relação à horas trabalhadas. A linha de corte de acordo com Olea (1999) é alcançada com aproximadamente 18 horas.

Para a área estudada seria necessário o tempo de aproximadamente 18 horas trabalhadas para alcançar o RMSE correspondente à linha de corte, com o valor de 3,22 metros. Observa-se que para um levantamento com pequena escala com um alto valor de RMSE, pequenos incrementos de horas trabalhadas podem melhorar de forma considerável o ajuste do modelo.

Observa-se que para a área estudada, seria necessário o valor de R\$ 3.500,00 aproximadamente para alcançar a linha de corte desejada. Para uma grade de pontos com maior densidade, observa-se a elevação dos valores de custo do trabalho de campo, porém com pequeno incremento na redução dos valores de RMSE. Considerou-se esse valor apenas o tempo necessário para a coleta de

pontos em campo, desconsiderando o tempo de deslocamento entre as estações de coleta e processamento dos dados.

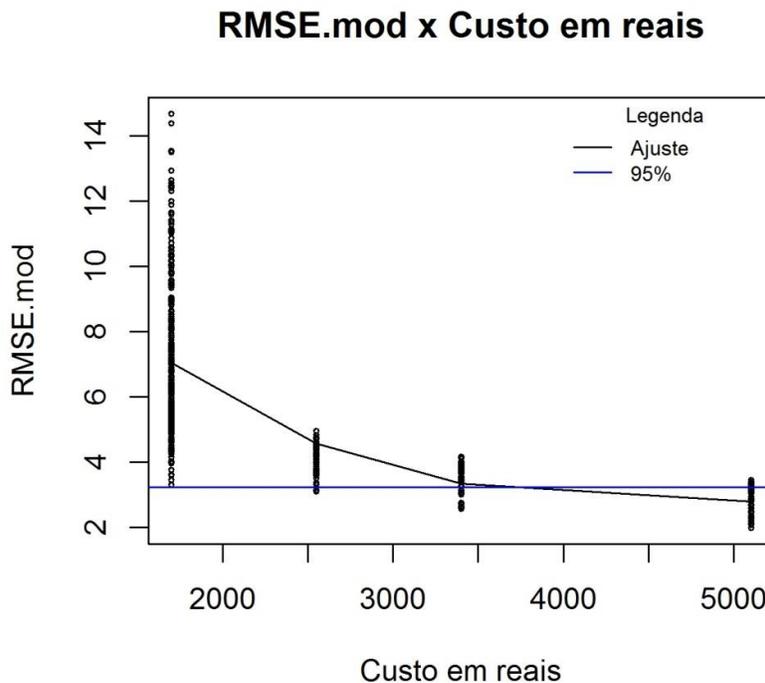


Figura 12 - Redução do RMSE em relação a horas trabalhadas.

3.4 - Modelo Digital de Elevação de alta resolução da Península Coppermine

Observa-se na Figura 11 o Modelo Digital de Elevação da Península Coppermine com resolução espacial de 1 metro, a partir dos dados LIDAR. Esse MDE possui 3.289.265 de células de 1 metro cada.

Esse MDE fornecerá aos pesquisadores material cartográfico para o desenvolvimento de pesquisas de alto nível de detalhamento, como estudos de mapeamento digital de solos, mapeamentos geomorfológicos, estudos relacionados a formação de solos e estabelecimento de comunidades vegetais na área.

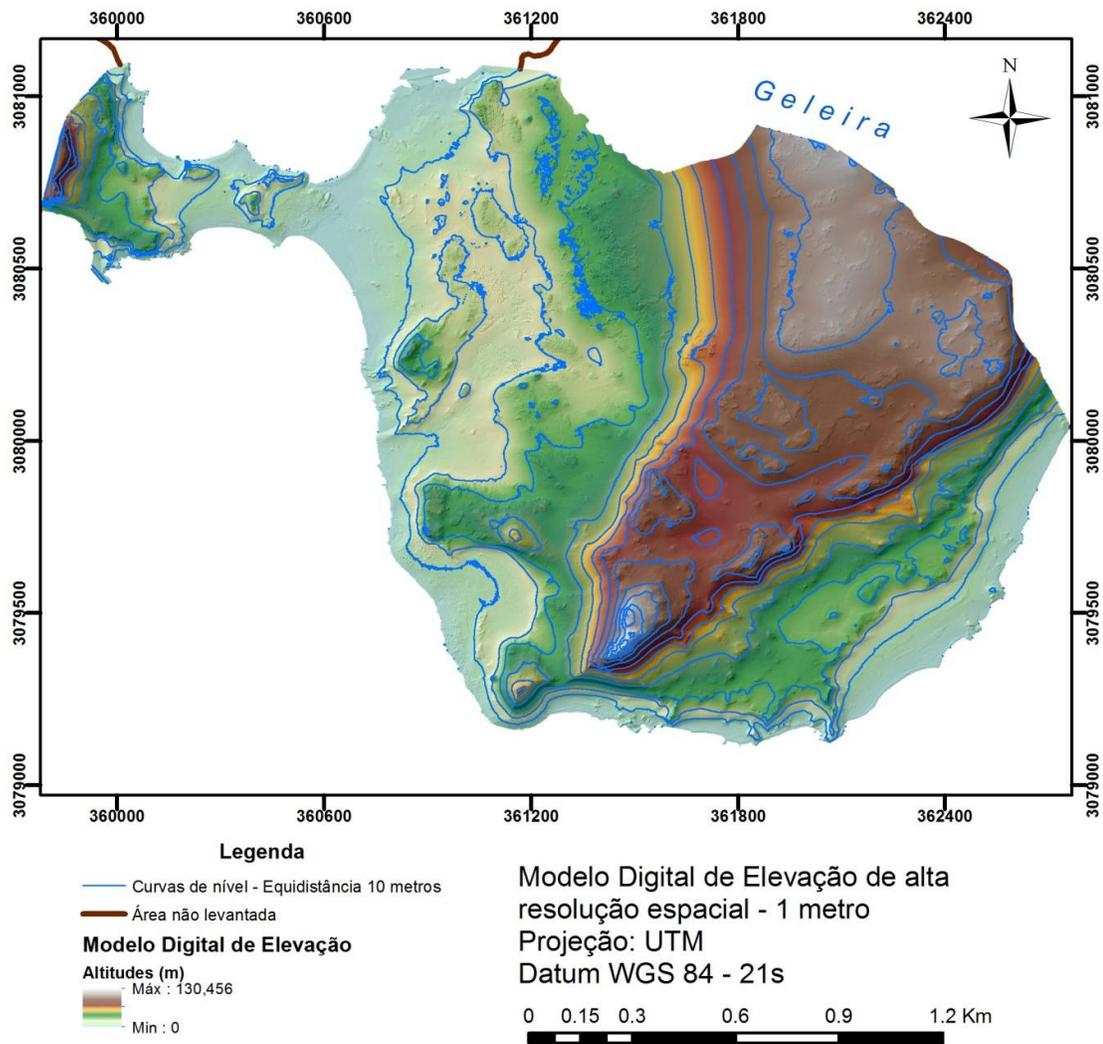


Figura 13 - Modelo Digital de Elevação, gerado à partir de Levantamento Topográfico de Alta Resolução

4 - CONCLUSÃO

Os diferentes padrões de amostragem e densidades de pontos interferem diretamente na qualidade dos Modelos Digitais de Elevação, na área estudada.

Os grids regulares apresentam melhor espacialização dos pontos em campo em relação à amostragem aleatória, reduzindo distância entre os pontos e a variância dos resultados e o RMSE. Para os grids regulares a linha de corte de acordo com Olea (1999), foi alcançada com a densidade de 3,94 pontos/ha e para o grid irregular a densidade foi de 4,55 pontos/ha. Esses resultados no entanto, foram obtidos para uma área de média complexidade de relevo, sendo que estudos complementares em áreas complexas devem ser realizados.

Os custos de levantamentos de campo apresentam maiores valores e horas trabalhadas para as grades de pontos mais densas. Através de um pequeno incremento da densidade de pontos, o valor do levantamento de campo poderá aumentar consideravelmente, sendo o relevo o importante fator a ser observado na amostragem de pontos na área.

5 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARCHELA, E., DA COSTA S.C., RAMINELLI J.A. Aplicação de modelagem geoestatística por krigagem para mapeamento do relevo exposto e do paleo-relevo sotoposto à bacia sedimentar de Curitiba. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 14, n. 1, 2013.

CAMARA, G., SOUZA, R.C.M., FREITAS, U.M., GARRIDO, J. In: Spring: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. 2006. Disponível < <http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/modelagem.html>>. Acesso em: 15 out . 2016.

CAMARGO E., MONTEIRO A.M.V., FELGUEIRAS C.A., FUKS S.D. Integração de Geoestatística e Sistemas de Informação Geográfica: Uma Necessidade. IN: Congresso e Feira para usuários de geoprocessamento da América Latina GIS Brasil 99, 1999, Salvador. **Anais Gis Brasil 99**, Salvador: UFBA.

CIANCI, F.G. **Uso de sistemas de informações geográficas no estudo da relação entre a incidência de AIDS em usuários de drogas injetáveis, o desenvolvimento humano e as apreensões de entorpecentes pela polícia no Estado de São Paulo no período de 1997 à 2004**. 2006. 46f . Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

COELHO, E.C., DE SOUZA E.G., URIBE-OPAZO M.A., NETO R.M. Influência da densidade amostral e do tipo de interpolador na elaboração de mapas temáticos. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 31, n. 1, p. 165-174, 2009.

CHAGAS, C.S., FERNANDES FILHO, E.I., FRANCELINO, M.R., CARVALHO JÚNIOR, W.D., SOUZA NETO, N.C.. Avaliação de modelos digitais de elevação para aplicação em um mapeamento digital de solos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n. 2, p. 218-226. 2010.

DOS SANTOS GALVANIN, E.A., DAL POZ, A.P. Sistema de Varredura a Laser: Características, Processamento e Métodos de Interpolação de dados. In: XXXII Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional, 2009, Cuiabá, Anais CNMAC, p. 303-309.

FERREIRA, M.P. **Redução do adensamento amostral no ajuste de modelos de semivariogramas**. 2015. 52f . Dissertação (Mestrado em Estatística Aplicada e Biometria) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2015.

HIEMSTRA, P. H.; PEBESMA, E. J.; TWENHÖFEL, C. J. W.; HEUVELINK, G. B. M. Real-time automatic interpolation of ambient gamma dose rates from the Dutch radioactivity monitoring network. **Computers and Geosciences**, v. 35, n. 8, p. 1711–1721, 2009.

NBR, ABNT. 13.133 – Normas Técnicas para a Execução de Levantamentos Topográficos. Rio de Janeiro, 1994.

OLEA, R. A. **Geostatistics for Engineers and Earth Scientists**. Boston, MA: Springer US, 1999.

PAULA, M.D. **Gênese e classificação de solos na península Coppermine (ilha Robert) e ilha Barrientos, Antártica marítima**. 2015. 84 f. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2015.

RIFFELI, C.T., GARCIA, M.S., SANTI, A.L., BASSO, C.J., FLORA, L.P.D., CHERUBIM, M.R., EITELWEIN, M.T. Densidade amostral aplicada ao monitoramento georreferenciado de lagartas desfolhadoras na cultura da soja. **Ciência Rural**, v. 42, n. 12, 2012.

SANTOS, N.T. Estatística Espacial Aplicada. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa. 293 p. 2008.

SCHÄFER, A., LOCH, R. Aplicação dos dados do sensor Laserscanner para modelagem do terreno visando projetos rodoviários. In: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto-SBSR, 2005, Goiânia, **Anais SBSR**, p. 749-756.

SCHÜNEMANN, A.L. **Geotecnologias para mapeamento digital na antártica marítima**. 2016. 114 f. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.

WILLMOTT, C. J.; MATSUURA, K. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. **Climate Research**, v. 30, n. 1, p. 79–82, 2005..