

ANÁLISES E TESTES DE MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO PARA DADOS BATIMÉTRICOS E GRANULOMÉTRICOS: ESTUDO DE CASO EM ARMAÇÃO DOS BÚZIOS, RIO DE JANEIRO, BRASIL

Analysys and Tests of Interpolation Methods for
Bathymetric and Granulometric Data: Case Study in
Armação dos Búzios, Rio de Janeiro, Brazil

Eduardo Manuel Rosa Bulhões¹
Minouche Klecz Drumond²

¹ Departamento de Geografia/ Polo Campos
dos Goytacazes/ Universidade Federal
Fluminense – UFF

² Laboratório de Geografia
Física/Departamento de Geografia/ Polo
Campos dos Goytacazes/ Universidade
Federal Fluminense – UFF

Resumo

Este estudo tem como objetivo apresentar os métodos geoestatísticos disponíveis para a interpolação de dados batimétricos e granulométricos, discutindo suas potencialidades e limitações para a preparação de mapas de contorno. Os primeiros resultados são apresentados para onze diferentes métodos de interpolação calculados pelo *software* Surfer 8 (*Golden Software Inc*) sobre grades de amostragem de dados batimétricos e de sedimentos de fundo na plataforma interna adjacente ao Cabo Búzios, Rio de Janeiro. Observando os parâmetros como modelo de semi-variograma, *range* e *midrange*, tempo de processamento, o coeficiente de assimetria, e os valores de Z, os resultados finais apontam que os métodos de melhor ajuste são aqueles que reproduzem os valores mais próximos daqueles da malha inicialmente definidos e valores menos poluídos. Considera-se então que, para os dados batimétricos, os métodos Vizinho Natural e Triangulação Linear foram os mais consistentes. Para os dados faciológicos os métodos de Vizinho Natural, Krigagem e Local Polinomial obtiveram o melhor ajuste. Espera-se que este trabalho contribua para o aprofundamento da investigação sobre este tema em Geociências principalmente para estudos voltados à caracterização de formas e composição do fundo marinho em áreas costeiras.

Palavras-chave: Geomorfologia costeira, Métodos de interpolação, Batimetria, Análise granulométrica, Rio de Janeiro.

Abstract

This study aims to present available geostatistical methods for interpolation of bathymetric and granulometric data, discussing their potentialities and limitations for preparation of contour maps. Initial results are presented for eleven different interpolation methods calculated by software Surfer 8 (*Golden Software Inc*) on sampling grids of bathymetric data and bottom sediments on the inner shelf adjacent to Cape Buzios, Rio de Janeiro. Observing parameters as

Correspondência:

Eduardo Bulhões
Universidade Federal Fluminense –
Departamento de Geografia – Polo Campos
dos Goytacazes - Rua José do Patrocínio,
71, Centro, Campos dos Goytacazes, CEP.:
28010-385 – RJ, Brasil.
Email: eduardobulhoes@id.uff.br

semi-variogram model, range and midrange, processing time, asymmetry coefficient, and Z values, final results confirms that the methods of best fit are those that reproduce the values closer to those of the initially defined mesh and are visually less polluted. Considering that, for bathymetrical data, *Natural Neighbour* and *Triangulation with Linear Interpolation* methods were the most consistent. For faciological data, the methods of Kriging, Natural Neighbor and Local Polynomial obtained the best fit. It is hoped that this work forward to further research on this subject specially regarding coastal geomorphology studies.

Keywords: Coastal geomorphology, Interpolation methods, Bathymetry, Granulometric analysis, Rio de Janeiro.

INTRODUÇÃO

Atualmente em geoestatística a discussão gira em torno dos métodos e modelos de espacialização ou regionalização de dados geológicos, geoquímicos, geomorfológicos e ambientais em geral e sua aplicação para determinados conjuntos de dados.

A interpolação pode ser definida como o procedimento matemático de ajuste de uma função a pontos não amostrados, baseando-se em valores obtidos em pontos amostrados. Na prática o processo de interpolação parte da definição de uma malha, seu espaçamento e suas dimensões. Esta malha é útil para estimar o valor de cada ponto (ou nó) pela seleção de pontos (nós) próximos com valores conhecidos. Os valores dos nós então serão redefinidos por filtragem e por funções (algoritmos) matemáticas que podem ser semelhantes aos valores iniciais (interpoladores exatos) ou aproximados dos valores dos pontos iniciais.

Os métodos de interpolação podem ser divididos entre os que usam funções globais e os que usam funções locais. Os primeiros consideram todos os pontos da área e permitem interpolar o valor da função em qualquer ponto dentro do domínio dos dados originais, onde a adição ou remoção de um valor terá consequências no domínio de definição da função. Estes são os polinômios, e as equações multiquadráticas. As funções locais podem ser definidas para determinadas porções dos mapas onde a alteração de um valor afetará apenas localmente os pontos próximos ao mesmo, estas funções são as de triangulação, inverso da potência das distâncias, base radial, krigagem, multiquadrática-biharmônica, e *splines* (Landim, 2003).

Os procedimentos de triangulação e de reticulação (*gridding*) são as principais formas de reorganização dos dados numa malha, como etapa inicial antes da aplicação das funções de interpolação. A triangulação conecta pontos amostrados através de triângulos e interpola os valores entre eles. São considerados métodos de estimação diretos, pois os contornos derivam do padrão original dos dados, não permitindo a extrapolação para fora da área amostrada. O procedimento de reticulação (*gridding*) define então uma malha regular (grid) sobre a área considerada e calcula os valores nos pontos (nós) do reticulado com base nos valores dos pontos já amostrados. São considerados métodos de estimação indiretos, uma vez que os contornos são construídos a partir dos dados e estimados para os nós da grade e não a partir dos dados originais. Estes permitem tanto a interpolação quanto a extrapolação para áreas além do perímetro amostral (Landim, 2003). Após a reticulação, um algoritmo matemático é utilizado para ajustar uma superfície através dos dados estimados para os nós (pontos). Estes algoritmos podem ser de variados tipos, porém os mais utilizados são a krigagem (*kriging*), inverso ponderado da distância (*inverse distance weighted*), mínima curvatura (*minimum curvature*) e a superfície de tendência (*trend surface*).

OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é determinar o método de melhor ajuste, recálculo e visualização para análise de informações interpoladas para topografia submarina (batimetria) e para a

interpolação de parâmetros estatísticos, associados à análise de fácies sedimentares na plataforma continental interna adjacente ao Cabo Búzios, levando em consideração os aspectos geostatísticos envolvidos na concepção de cada um dos onze métodos de interpolação investigados.

ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo focalizada neste trabalho são as proximidades do Cabo Búzios. Este por se tratar de uma protuberância natural da linha de costa, composta por praias dos mais variados tamanhos e formas, orientadas e expostas às ondulações dos quadrantes Nordeste ao Sudoeste, e por ser uma lacuna no conhecimento até então gerado sobre processos e feições, dentro do litoral do estado do Rio de Janeiro, o que proporciona o ineditismo deste trabalho.

Esta área, segundo a classificação proposta por Muehe (1998), está fisiograficamente localizada no flanco sul do macro-compartimento da Bacia de Campos, que tem como características marcantes as extensas planícies flúviomarinhas, cujo maior expoente é o delta do Rio Paraíba do Sul. O Cabo Búzios aparece como limite sul de um embaiamento que se estende por cerca de 14 km até o município de Rio das Ostras. Trata-se de uma planície costeira associada a sedimentação dos rios Una, São João e das Ostras, marcados por feixes paralelos de cristas de praias, afloramentos terciários do Grupo Barreiras e afloramentos cristalinos (Amador, 1980, Martin e Suguio, 1989 *apud* Fernandez, 1998). Neste sentido, o Cabo Búzios, apresenta-se como uma feição marcante, visto que representa não só uma mudança na orientação da linha de costa, como também apresenta limites bem definidos de ambientes de sedimentação.

Quanto a composição e ao transporte sedimentar, aparece duas influências distintas. Uma de norte para sul associada principalmente a sedimentação fluvial dos Rios São João, Rio Macaé e do Rio Paraíba do Sul (Saavedra, 1994.; Fernandez, 1998; Saavedra e Muehe, 1994). O outro tipo de sedimentação ocorre das regiões ao largo do Cabo Búzios em direção as áreas mais rasas, associados a ressurgência costeira com seus vórtices e correntes ascendentes ressuspensando estes sedimentos mais finos, que estão ali posicionados provavelmente por convergência de fluxos do Rio Paraíba do Sul e da Baía de Guanabara (Saavedra, 1994.).

A face norte do Cabo Búzios marca esta transição para ambientes cuja sedimentação é positivamente associada à fluxos fluviais que com material terrígeno fino em suspensão transformam a paisagem costeira, passando de águas límpidas frias e transparentes (ex. praia de João Fernandes e Geribá, para ambientes turvos de águas quentes (ex. praia de Manguinhos e praia Gorda). Esta transição fica marcada para quase toda a sedimentação no litoral centro-norte e norte do estado, que passa a partir desta área a ser predominantemente marcada pela sedimentação fluvial e características deposicionais associadas.

MATERIAIS E MÉTODOS

Digitalização e Compilação de Dados Batimétricos

Os dados batimétricos foram compilados a partir da Folha de Bordo FB 1505 e da Carta Náutica CN 1505, ambos os resultados das sondagens realizadas pela Marinha Brasileira na década de 80. Estas foram georreferenciadas e digitalizadas utilizando o software *Didger* 3.0. Em seguida foram feitas transformações de coordenadas e *datum* utilizando o software *NOAA Chart Reprojector*, para que passassem à projeção UTM e para o *datum* WGS 1984. Disto resultou uma malha batimétrica com cerca de 8700 pontos com informações de posição (X,Y) e profundidades (Z), ajustadas ao nível médio do mar, que foram utilizadas como malha inicial para as interpolações. Abaixo a malha batimétrica utilizada (Figura 01).

Malha Batimétrica

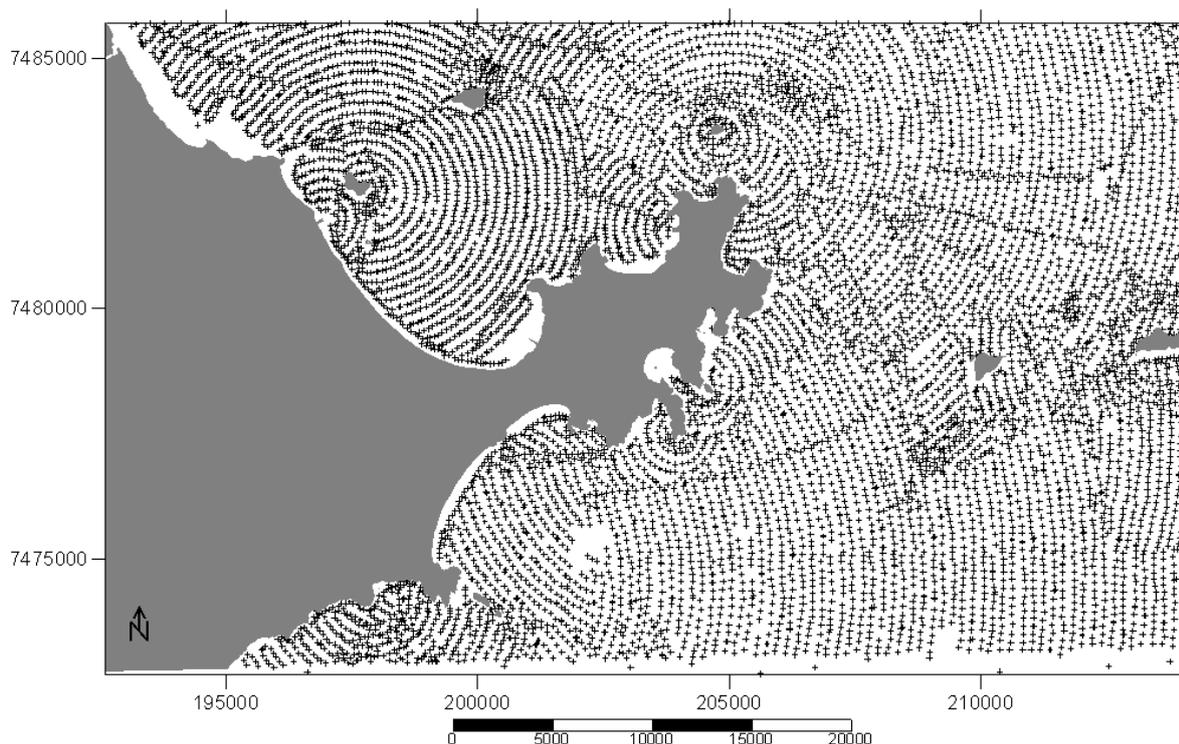


Figura 01. Malha Amostral dos Dados Batimétricos.

Levantamento e Análise de Sedimentos de Fundo

Para os resultados faciológicos, foi selecionada a porção norte do Cabo Búzios onde foram coletadas e analisadas em laboratório dados pontuais de 133 amostras sendo estas 76 na plataforma continental interna e 57 ao longo das praias (face, zona de surfe e antepraia). A malha de distribuição das coletas é apresentada na figura 05. A parametrização estatística das amostras foi feita utilizando o software Gradistat v7 e especificamente para estes resultados foi utilizada a Média do diâmetro granulométrico para a interpolação.

A primeira etapa quando das amostras no laboratório é a retirada de boa parte do conteúdo de sais dissolvidos através de lavagens sucessivas com cerca de 800 ml de água destilada, **recomenda-se 4 lavagens**. Esta etapa deve ser cuidadosa pois para a retirada da água com o sal dissolvido pode haver perda das frações mais finas da amostra. Quando há a presença de matéria orgânica é utilizada uma solução com 10 ml de peróxido de hidrogênio para a eliminação dos mesmos, o que também é útil para retirada dos sais.

Em seguida a amostra é colocada em estufa a 100°C para a secagem da amostra por evaporação. O tempo depende da quantidade de água na amostra, mas normalmente em 48 horas a amostra estará pronta para ser retirada da estufa. Em seguida é feito o quarteamento, utilizando-se um quarteador de Jones (figura 06). O objetivo é selecionar uma subamostra representativa entre 40 e 60 gramas que traga consigo proporcionalmente as mesmas frações granulométricas da amostra como um todo. Após o quarteamento é feito o peso inicial da amostra, em seguida é montado o jogo de peneiras em intervalos de 0,5 em 0,5 Φ , representativo das peneiras com abertura em milímetros de 4,0 - 2,83 - 2,0 - 1,41 - 1,0 - 0,710 - 0,5 - 0,35 - 0,25 - 0,177 - 0,125 - 0,088 e 0,062. Os intervalos finais são representados por peneiras de 0,25 em 0,25 Φ para uma melhor representação da "cauda" da curva de assimetria positiva. Uma

vez montado as amostras são submetidas a agitadores mecânicos durante 15 minutos. Após a agitação das peneiras é pesada a fração retida em cada uma das peneiras e no fundo e anotado numa planilha.

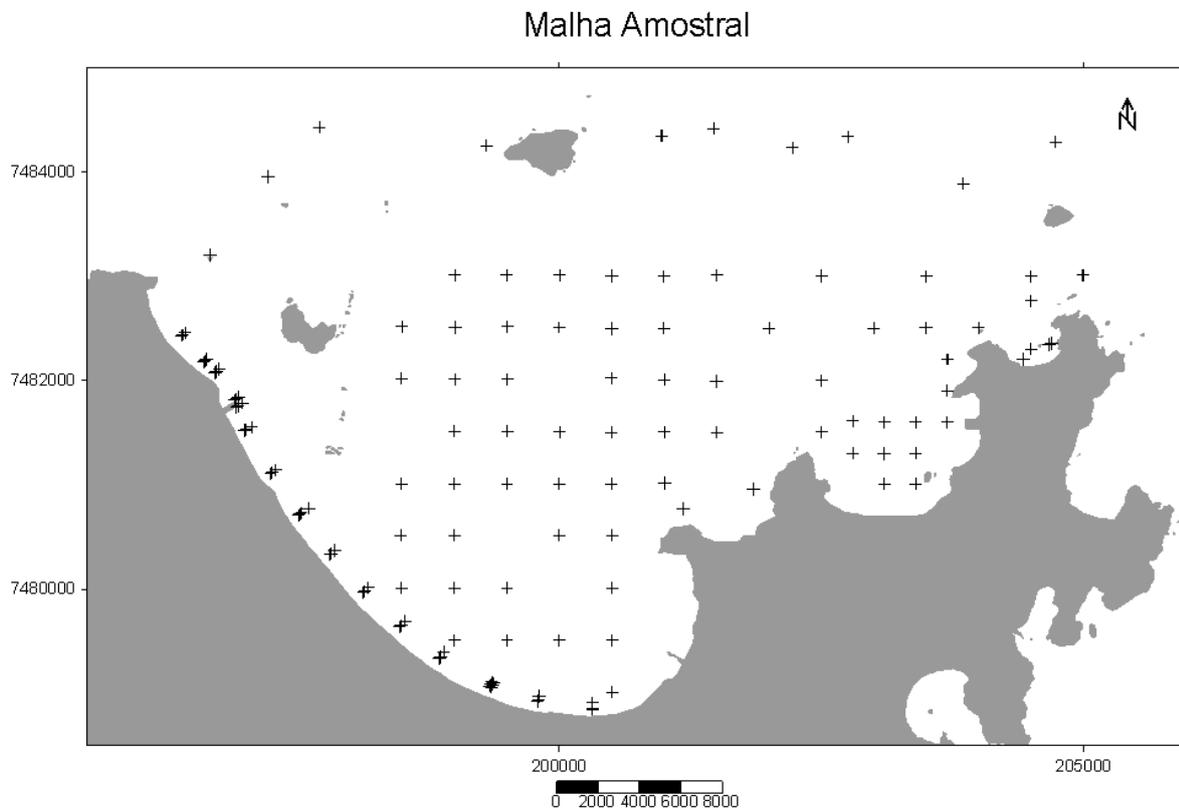


Figura 02. Malha amostral da distribuição da coleta de sedimentos.

Métodos de Interpolação

Os cálculos de interpolação foram feitos utilizando-se o *software* Surfer 8.0 da *Golden Software*. Foram feitos testes com todos os interpoladores disponíveis que pudessem ter como saída representações em duas dimensões como os mapas de contorno que serão apresentados nos resultados.

O *software* Surfer 8, em termos operacionais, constrói uma malha regular de pontos XYZ a partir de uma malha regular ou irregular de pontos de entrada, e somente após este procedimento são construídos os mapas de interpolação, este procedimento é denominado "gridagem", ou seja, a construção de um *grid* espacialmente regular de pontos. Cada método de interpolação constrói um *grid* de acordo com o algoritmo específico e este procedimento é útil para a construção das linhas de contorno da superfície. A seguir segue breve descrição dos 11 métodos de interpolação utilizados:

(I) Inverso Ponderado das Distâncias (*Inverse Distance to a Power*): Normalmente é tido com um interpolador exato, pois é razoavelmente fiel aos pontos amostrados originalmente. São atribuídos pesos a cada ponto de dado (nó) e a interpolação ocorre com este ponto tendo maior peso sobre aqueles mais próximos. Para os pontos circundantes são atribuídos fracionamentos, quanto maior é a distância deste nó, menor seu peso (maior o fracionamento) na determinação dos valores de outros pontos circundantes. Uma das características que diferenciam este interpolador é a geração de "olhos de boi" (*bull's eyes*) que ocorrem na forma de círculos de mesmo valor que coincidem com os nós de maior peso na distribuição dos resultados.

(II) Krigagem (Kriging): É o método de estimativa de valores de variáveis distribuídas no espaço (ou no tempo) a partir de valores adjacentes enquanto considerados como interdependentes pelo semivariograma. Vêm sendo referido e utilizado como o principal método de interpolação em geoestatística. Trata-se de um método de estimativa por médias móveis, que expressa padrões sugeridos na malha (retícula) amostral. Pode ser um interpolador exato ou suavizador, dependendo das características (modelo de variograma e semivariograma, efeito pepita e tipo de tração) que podem ser definidas para este método.

Segundo Landim (2003) a krigagem normalmente é utilizada para a previsão do valor pontual de uma variável regionalizada em um determinado local dentro do campo geométrico, pois é um procedimento de interpolação exato que considera todos os valores observados. Pode ser usada para o cálculo médio de uma variável regionalizada para um volume ou área maior que o suporte geométrico (efeito extrapolação). Pode ser também utilizada para estimativas de deriva de modo similar as superfícies de tendência. A krigagem usa informações a partir do semivariograma para encontrar os pesos ótimos a serem associados às amostras que irão estimar um ponto, um painel ou um bloco. Como o semivariograma é uma função da distância entre as amostragens, determinam-se pesos diferentes de acordo com o arranjo geográfico definido pelo *grid* amostral. Ainda segundo o autor com este método torna-se viável a melhor estimativa possível para locais não amostrados, pela minimização da variância do erro.

O método da krigagem oferece algumas opções de customização que podem ser importantes de acordo com os dados disponíveis. As opções para o Modelo de Variograma (*Variogram Model*) que vai definir como este será calculado podem ser Linear, Exponencial, Gaussiano, Esférico, Quadrático, Cúbico, Pentaesférico dentre outros. O padrão utilizado é o Linear, mas para maior acurácia sugere-se comparar a curva gerada no variograma dos dados de entrada e escolher uma opção que melhor se assemelhe; O Tipo de Tração (*Drift Type*) pode ser selecionado Sem Tração, Tração Linear, ou Tração Quadrática. A primeira opção é apropriada para um conjunto de dados denso e regularmente distribuído. A segunda e terceira opção são úteis quando existem buracos ou irregularidades na malha de dados utilizada, surge como uma forma de extrapolação dos dados; por fim o Efeito Pepita (*Nugget Effect*) deve ser utilizado quando o tamanho das amostras dos dados é muito pequena para ser estatisticamente representativo. Esta especificação faz com que o método da krigagem passe de um interpolador exato para um interpolador de suavização, estendendo a interpolação para áreas maiores e consequentemente aumentando o intervalo de confiança dos dados.

(III) Curvatura Mínima (Minimum Curvature): Método segundo o qual equações diferenciais ajustam uma superfície. São efetuados cálculos de derivação repetidamente até que seja alcançada uma diferença especificada entre os valores amostrados e os estimados, ou até que um número máximo de interações seja atingido (Landim, 2003). É amplamente utilizado em aplicações nas ciências da Terra. A representação da superfície interpolada assemelha-se a uma placa fina e elástica passando através de cada um dos pontos de dados com a menor curvatura possível. A superfície estimada é a mais suave entre todos os métodos. Não é exatamente um interpolador, ou seja, não retrata fielmente os valores da malha de dados utilizada.

(IV) Funções de Base Radial (Radial Basis Functions): É um grupo diverso de interpoladores, do qual o multiquadrático se destaca, principalmente para a construção de superfícies suavizadas. Todas as funções utilizadas são interpoladoras, ou seja, honram exatamente a base de dados definida. Estas funções são análogas as que podem ser definidas com o método da Krigagem, tornando este método bastante semelhante. As funções definem automaticamente a melhor distribuição de pesos a ser aplicada em todos os pontos de dados.

(V) Método Modificado de Shepard (Modified Shepard's Method): Este método usa pesos da distância inversa menos os métodos dos mínimos quadrados. É muito semelhante a o

método Inverso das Distâncias, porém sem a geração dos olhos de boi (*bull's eyes*) visto que estes são eliminados pelos mínimos quadrados.

(VI) Triangulação com Interpolação Linear (*Triangulation with Linear Interpolation*): É um interpolador exato, onde o método trabalha com a criação de triângulos, ao desenhar linhas entre os pontos de dados. Esta conexão é perfeita na forma que nenhum triângulo sobrepõe o outro. O resultado é um mosaico de superfícies triangulares ao longo de toda a extensão do *grid*. Cada triângulo define um plano entre os pontos com o decaimento e a elevação do triângulo sendo determinada pelos três pontos de dados originais, nos vértices. O dado original é o dado utilizado na geração dos triângulos, sendo perfeitamente representados neste interpolador.

(VII) Vizinho Natural (*Natural Neighbour*): Pode ser utilizado tanto para interpolação quanto para extrapolação, e geralmente funciona bem com malha de pontos regularmente distribuídos. É outro método que utiliza as funções de inverso das distâncias. Pode ser utilizado para malhas amostrais de grande porte.

(VIII) Vizinho mais Próximo (*Nearest Neighbour*): Assume o valor do ponto da malha de dados mais próximo para cada um dos pontos de valores do *grid* calculado. É recomendado e bastante útil quando a base de dados já está disposta numa malha como um *grid*, regularmente espaçado e com poucos valores faltando. Utiliza-se de uma Elipse de Procura (search ellipse) aonde dentro desta são determinados valores semelhantes. Ao reduzir ou aumentar o tamanho desta elipse de procura aumenta-se ou diminui-se a extrapolação dos dados, ou seja, cobrindo ou não áreas onde faltam valores.

(IX) Regressão Polinomial (*Polynomial Regression*): É utilizado para encontrar padrões em larga escala dentro de uma malha de dados. Não é realmente um interpolador, pois não se propõe a prever um valor específico de Z. É um método que também necessita de customização aonde será definido o tipo de regressão do polinômio que pode ser de uma Superfície Simples e Plana (*Simple Planar Surface*), Superfície Quadrática (*Quadratic Surface*), Superfície Cúbica (*Cubic Surface*) ou Sela Bi-Linear (*Bi-Linear Saddle*). Estes métodos ajustam os valores Máximos para X, para Y e para Z que a função deve calcular e a partir de então são definidos os dados para o *grid*.

(X) Polinômio Local (*Local Polynomial*): É melhor aplicável num conjunto de dados que já são suavizados. Ajusta os valores do *grid* utilizando o método de pesos dos mínimos quadrados (*least weighted squares*) como a função dentro de uma Elipse de Procura, de dimensões customizáveis.

(XI) Média Móvel (*Moving Average*): É aplicável para conjuntos grandes e muito grandes de dados. Este método extrai tendências intermediárias de um número mínimo de pontos definidos dentro de uma "Elipse de Procura" (*Search Ellipse*), associada a cada um dos pontos do *grid*. O valor final de cada um dos pontos do *grid* é igual a media aritmética de todos os pontos vizinhos identificados. Se dentro da elipse de procura não houver o número mínimo de pontos definidos para o cálculo, aquela área aparecerá em branco.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da interpolação permitiram identificar algumas características peculiares a cada método e isto foi tomado como forma de avaliação destes. Características mais específicas estão sumarizadas nas tabelas que seguem no final de cada subitem.

Resultados de Batimetria

O resultado produzido pelo interpolador *Inverse Distance to a Power* (figura 03), mostra curvas batimétricas nada suaves, destacando as pequenas irregularidades na malha batimétrica e

conforme o esperado produzindo núcleos circulares (*bull's eyes*) de mesma profundidade sobretudo próximas à linha de costa. Este interpolador revela então a proximidade das linhas batimétricas na porção NE do Cabo Búzios, sendo esta uma área mais íngreme do que a porção N e NW que são áreas de relevo mais plano. A influência das ilhas nos contornos batimétricos também deve ser destacada. Visualmente tem-se uma superfície um tanto quanto poluída, porém real já que se trata de um interpolador exato.

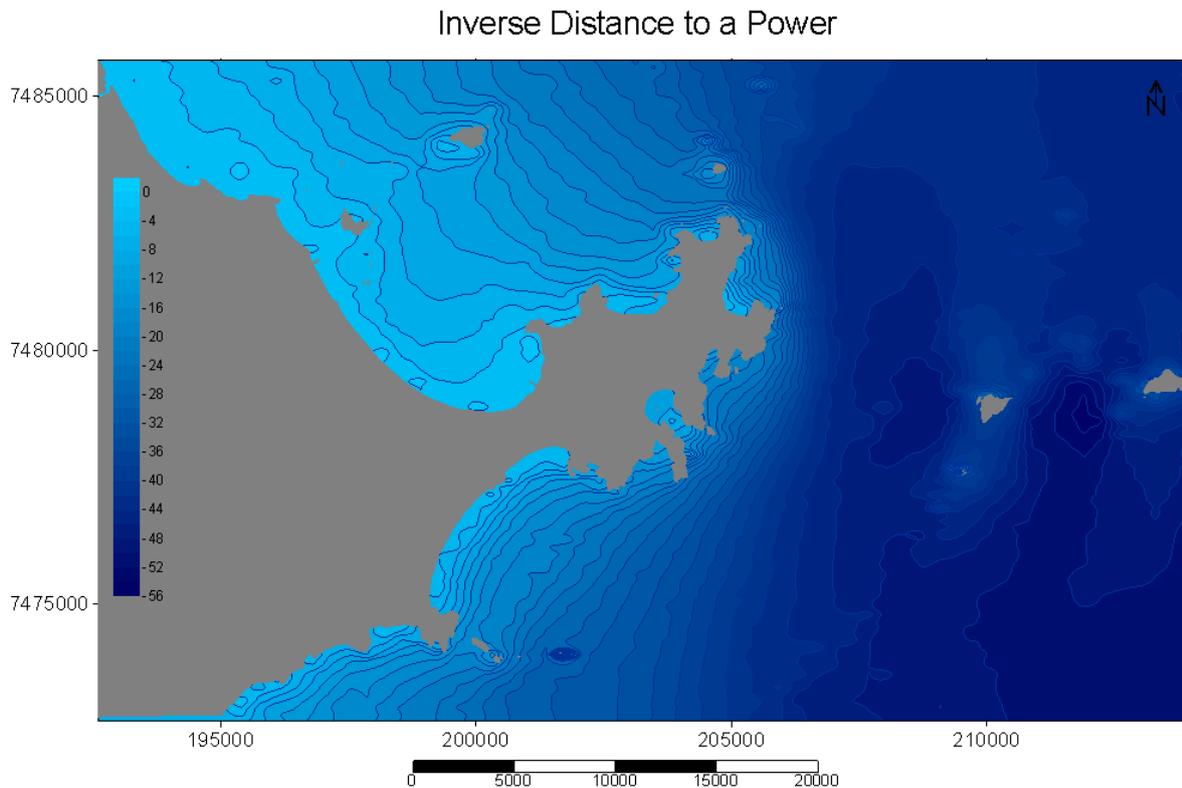


Figura 03. Interpolação usando o método *Inverse Distance to a Power*.

Os resultados produzidos pelo método da Krigagem (*Kriging*) na figura 04 também revelam irregularidades nas curvas batimétricas o que à respeito do interpolador anterior revelam uma topografia marcada por transições suavizadas na porção N e NW e íngremes na porção NE e E do Cabo Búzios. O efeito das ilhas também é destacado, porém as curvas associadas aparecem mais suavizadas. Áreas de maior profundidade (azul mais escuro) aparecem bem destacadas na porção E e SE do mapa que são apenas interrompidas pela presença das ilhas. A presença de pequenos artefatos mostram irregularidades locais nas profundidades. Além disso, o interpolador atuou como extrapolador e por isso, valores positivos foram criados, algo não desejável neste tipo de estudo.

Os resultados produzidos pelo método de *Minimum Curvature* (figura 05) mostram um aspecto de endenteação das curvas batimétricas o que está longe de ser um resultado agradável para este tipo de dado. Porém os principais aspectos da malha batimétrica estão representados, que são: a influência das ilhas na formação de núcleos circulares de mesma profundidade, e a diferença entre a porção N NW e da porção NE e E na proximidade das curvas batimétricas, mostrando diferenças de declividade do fundo.

Kriging

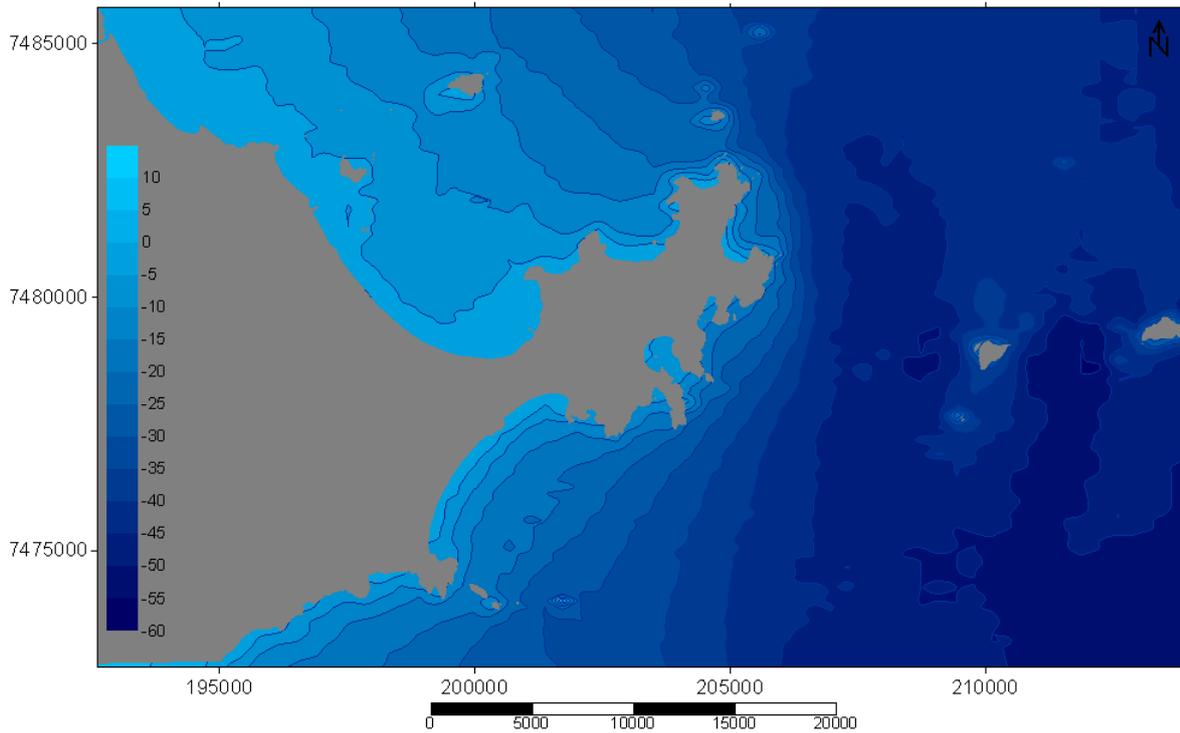


Figura 04. Interpolação usando o método *Krigagem*.

Minimum Curvature

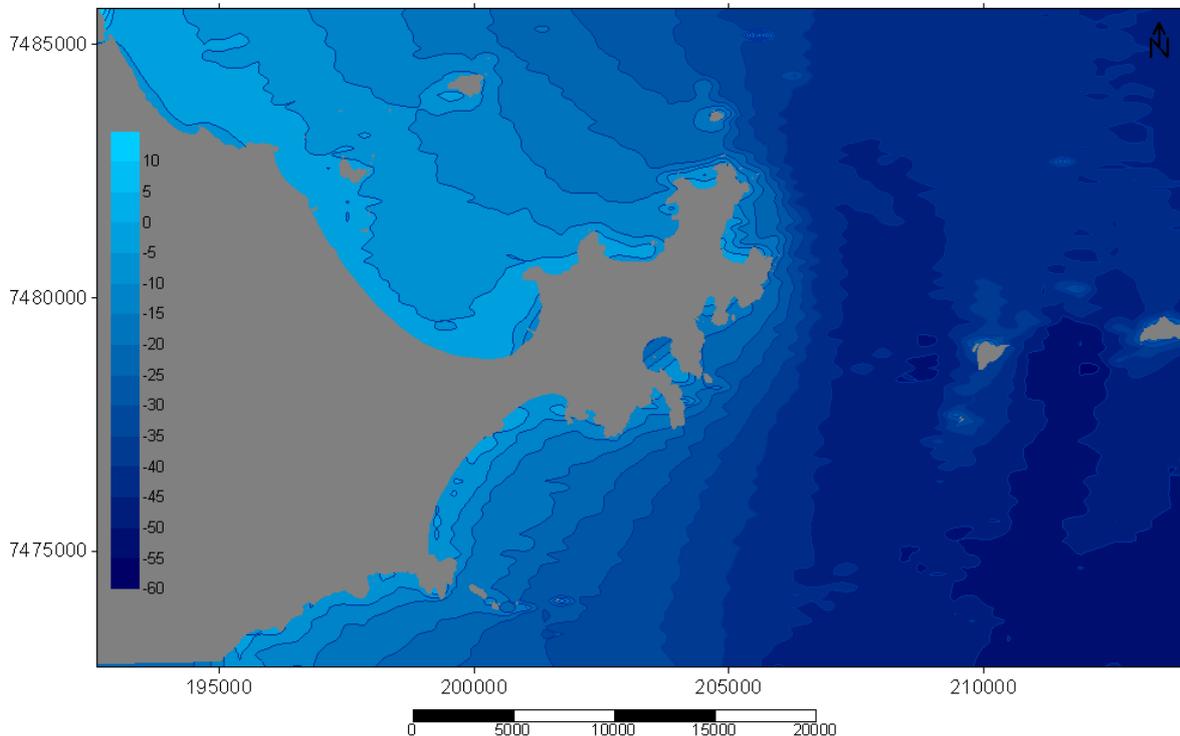


Figura 05. Interpolação usando o método *Minimum Curvature*.

Os resultados produzidos pelo método *Modified Shepard's* (figura 6) apresenta uma característica diferente dos anteriores que é a produção de áreas em branco (*blank*) aonde não existem de fato dados batimétricos o que torna a perspectiva de produção dos mapas mais

realista, já que nem sempre existem dados suficientes para a interpolação em todas as áreas. É um método simples de interpolação e não de extrapolação.

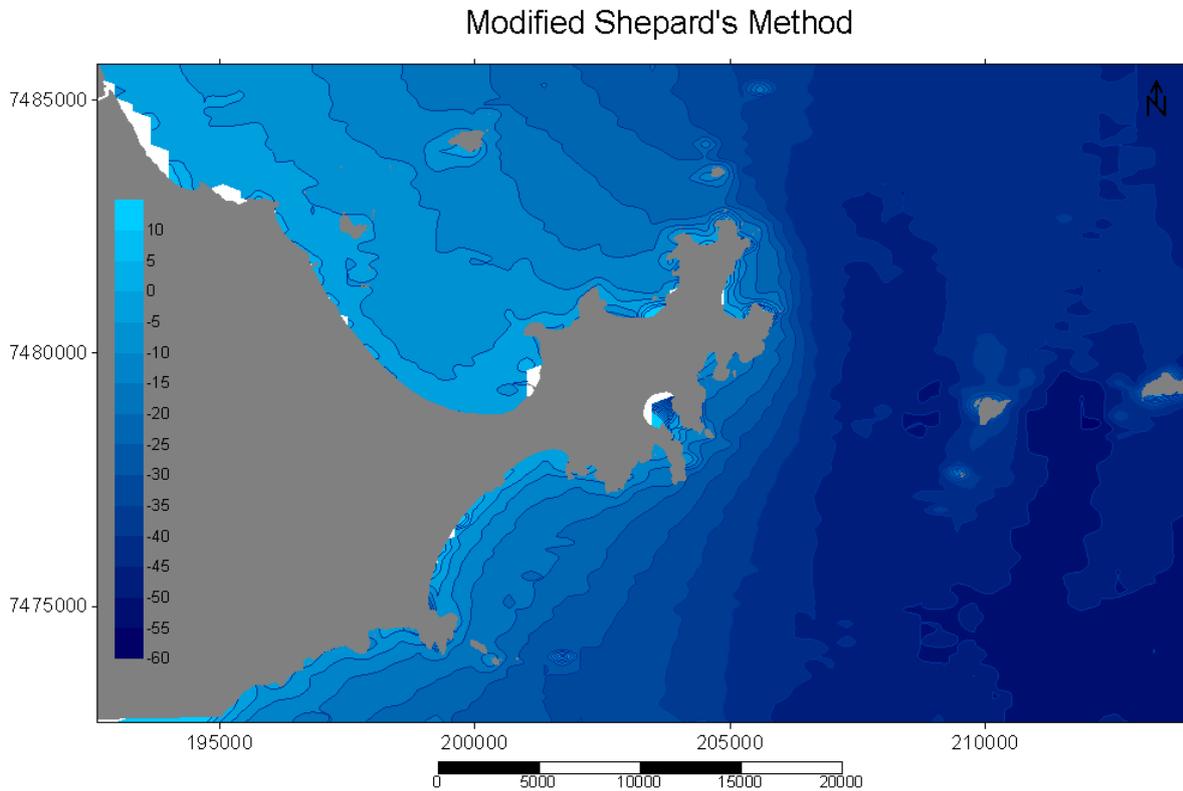


Figura 06. Interpolação usando o método *Modified Shepard's Method*

O resultado produzido pelo método *Natural Neighbour* (figura 07) aparece muito semelhante ao método da krigagem. Tal fato se deve a boa malha de dados batimétricos utilizada pelos interpoladores para gerar as respectivas retículas. Este método mostra uma relativa suavidade nas curvas e um resultado satisfatório para a visualização dos dados.

O resultado produzido pelo método *Nearest Neighbour* (figura 08) mostra um padrão semelhante ao resultado do *Modified Shepard's Method* onde as linhas batimétricas aparecem fortemente endenteadas. O padrão desta endenteação porém aparece numa orientação bem definida que é SE-NW. Mesmo assim muitos artefatos indesejáveis aparecem no mapa o que o torna com um aspecto poluído, o que, por vezes, não é algo desejável.

Natural Neighbour

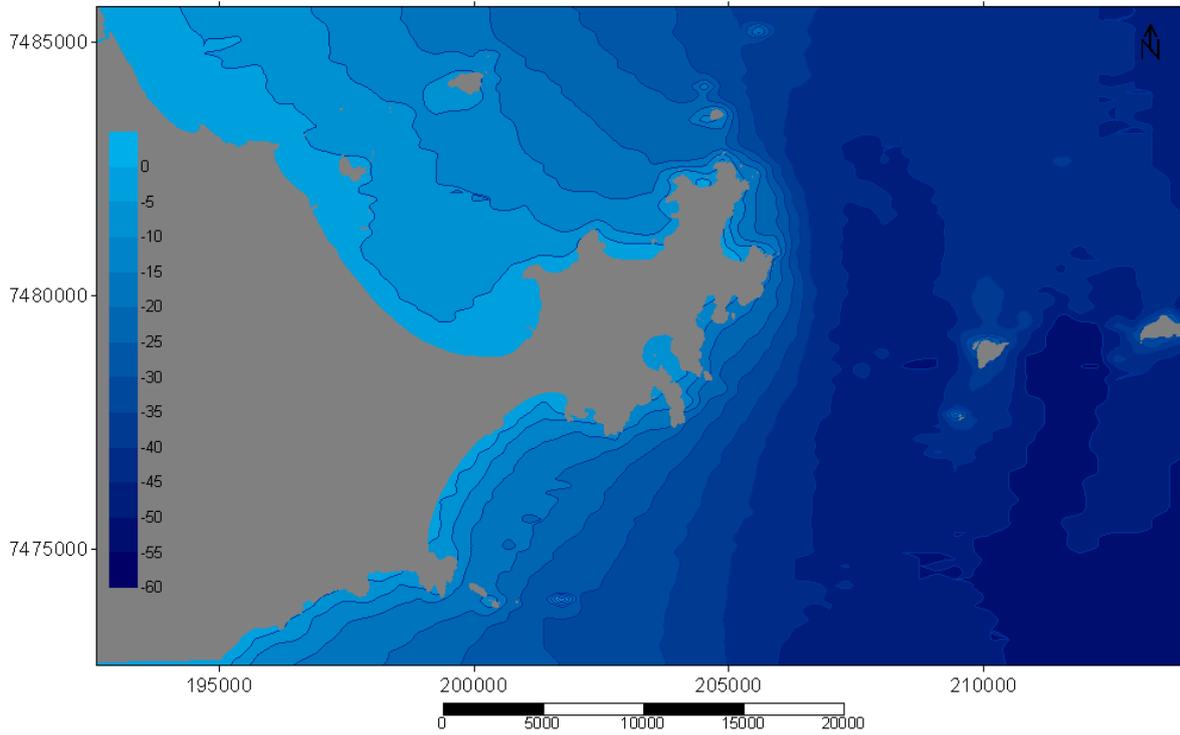


Figura 07. Interpolação usando o método *Natural Neighbour*.

Nearest Neighbour

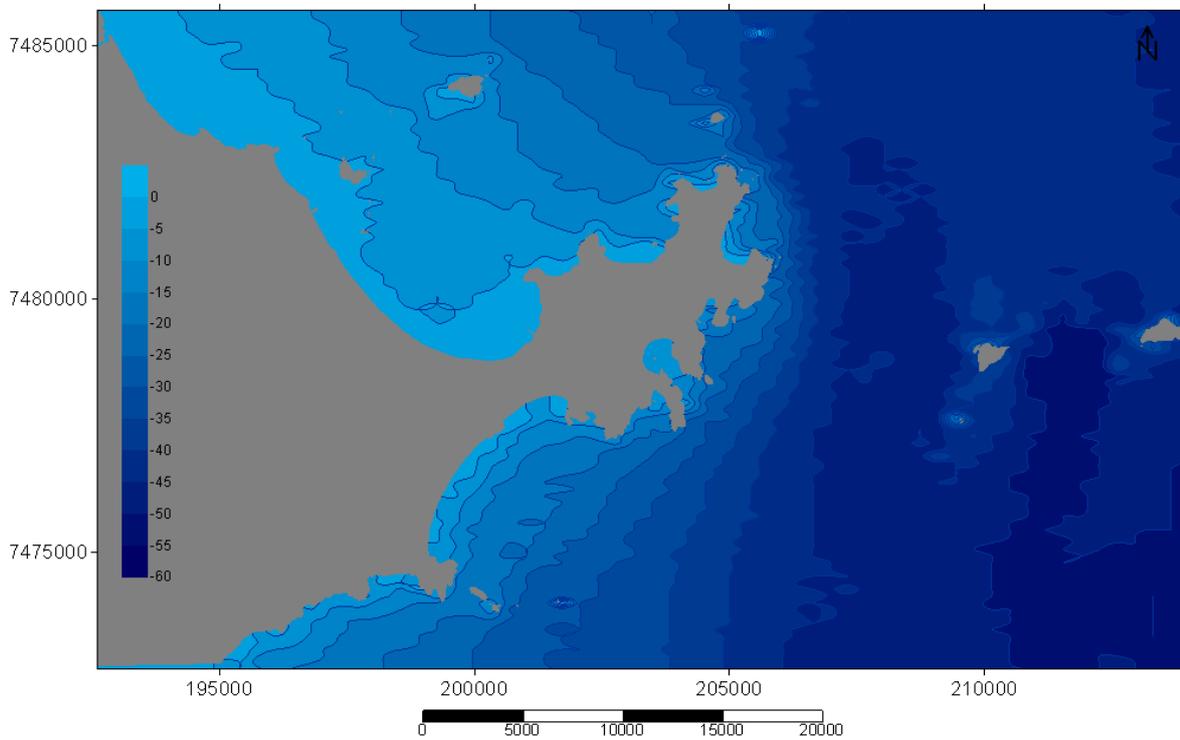


Figura 08. Interpolação usando o método *Nearest Neighbour*.

O resultado produzido pelo método de *Polynomial Regression* (figura 09) generaliza de forma interessante os resultados de batimetria mostrando a tendência geral desta área. Aparece então uma tendência paralelizada de diminuição das profundidades entre a porção SE e a porção NW do mapa. Como resultado específico para a caracterização de uma área de dimensões menores não se apresenta como um bom interpolador. Porém a informação resultante em termos generalistas apresenta-se útil.

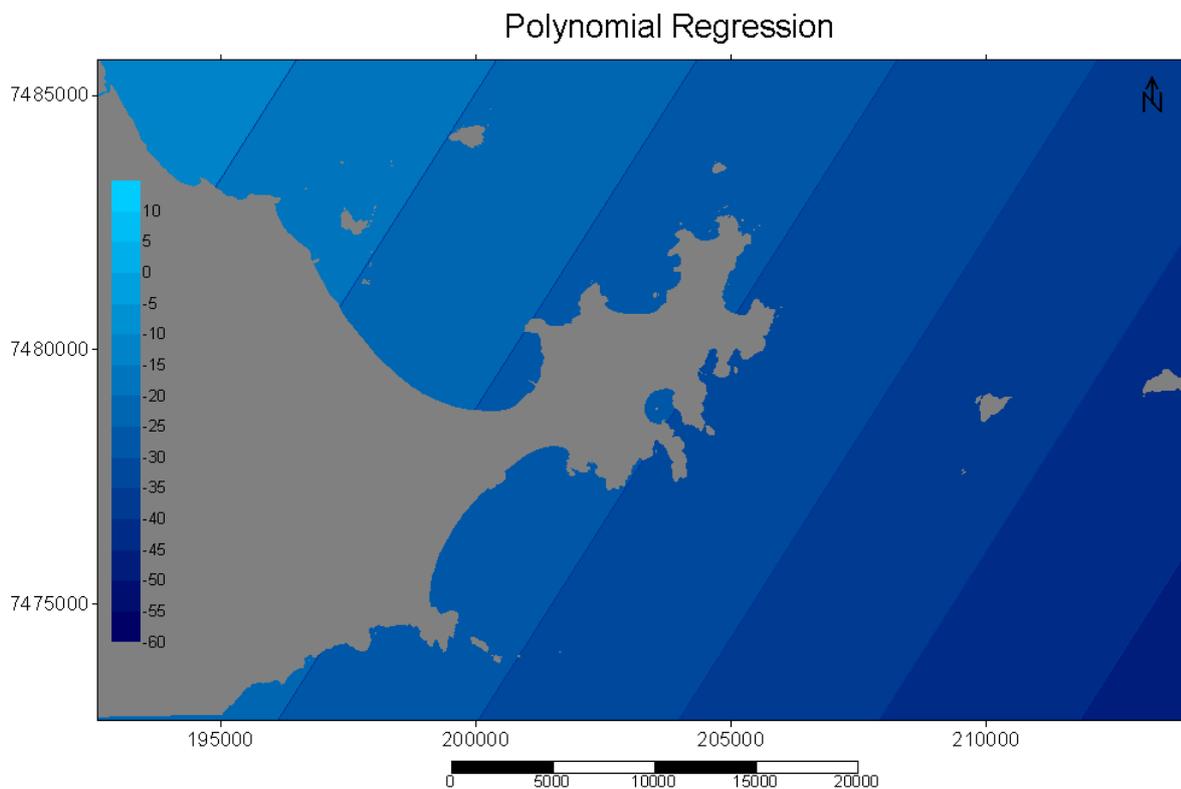


Figura 09. Interpolação usando o método *Polynomial Regression*.

Os resultados produzidos pelo método *Radial Basis Function* (Figura 10) que utiliza funções multiquadráticas para a interpolação o que o tornaria muito próximo do interpolador Krigagem traz consigo aspectos extremamente poluídos. Os dados batimétricos são dados com precisão centimétrica e isto explicaria a formação de núcleos batimétricos irregulares, porém é desejável que um interpolador torne estas diferenças mais suaves e inteligíveis para aquele que esteja apenas observando um mapa. As feições que aparecem no mapa estão muito detalhadas o que pode ser interessante, por exemplo, caso queiram-se examinar a influência de lajes rochosas rasas e submersas, bancadas de coral, cânions e etc. Porém numa área relativamente pequena e próxima à costa este método pode confundir e acabar mostrando feições que de fato não existem.

Os resultados produzidos pelo método *Triangulation with Linear Interpolation* (figura 11) também não difere muito daqueles já citados como satisfatórios como a *krigagem* e o *natural neighbour*. Apesar de ser um interpolador voltado para a representação de superfícies em três dimensões, a representação por linhas de contorno aparece relativamente suavizada e fidedigna aos dados batimétricos iniciais. A presença de irregularidades é reduzida.

O resultado produzido pelo método *Moving Average* (figura 12) não apresentou nenhuma característica útil para a interpretação batimétrica. O resultado produzido pelo método *Local Polynomial* (figura 13) mostra-se satisfatório no que diz respeito à suavização dos contornos batimétricos mostrando todas as tendências esperadas para a área de estudo em destaque. A

ausência total de irregularidades torna este interpolador útil para a produção de um mapa batimétrico onde as tendências gerais de declividade e direção das curvas devem ser destacadas.

Radial Basis Function

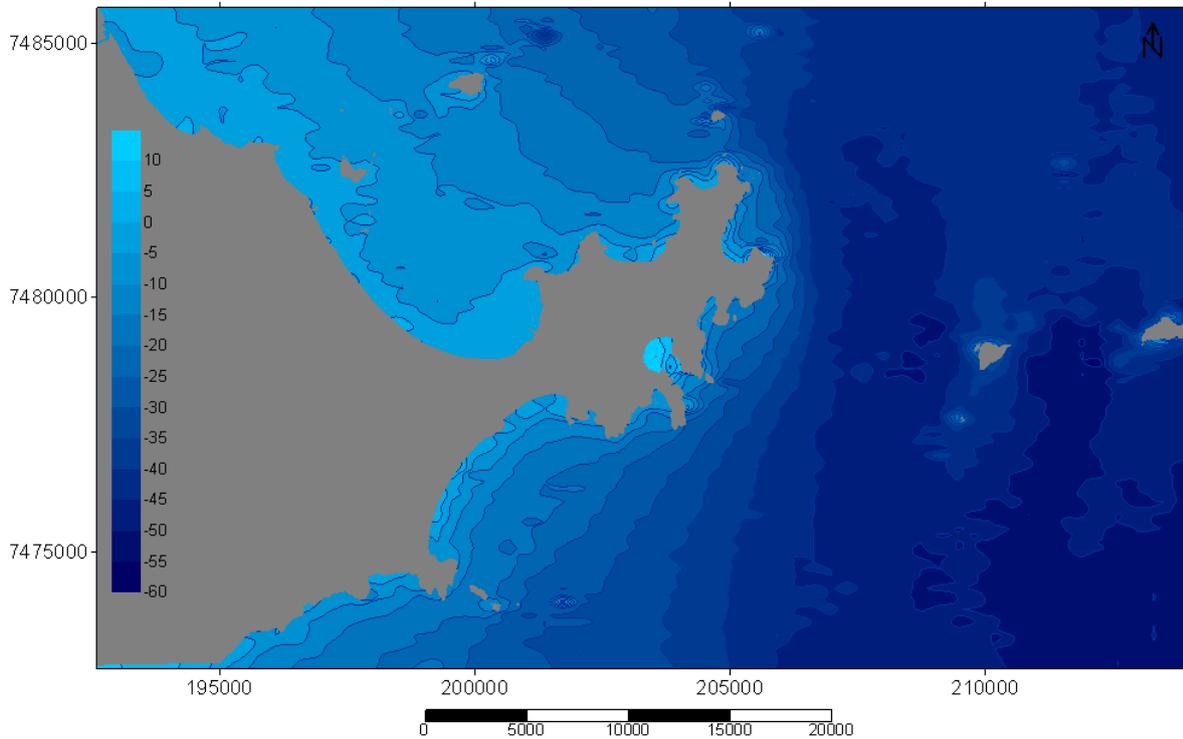


Figura 10. Interpolação usando o método *Radial Basis Function*.

Triangulation with Linear Interpolation

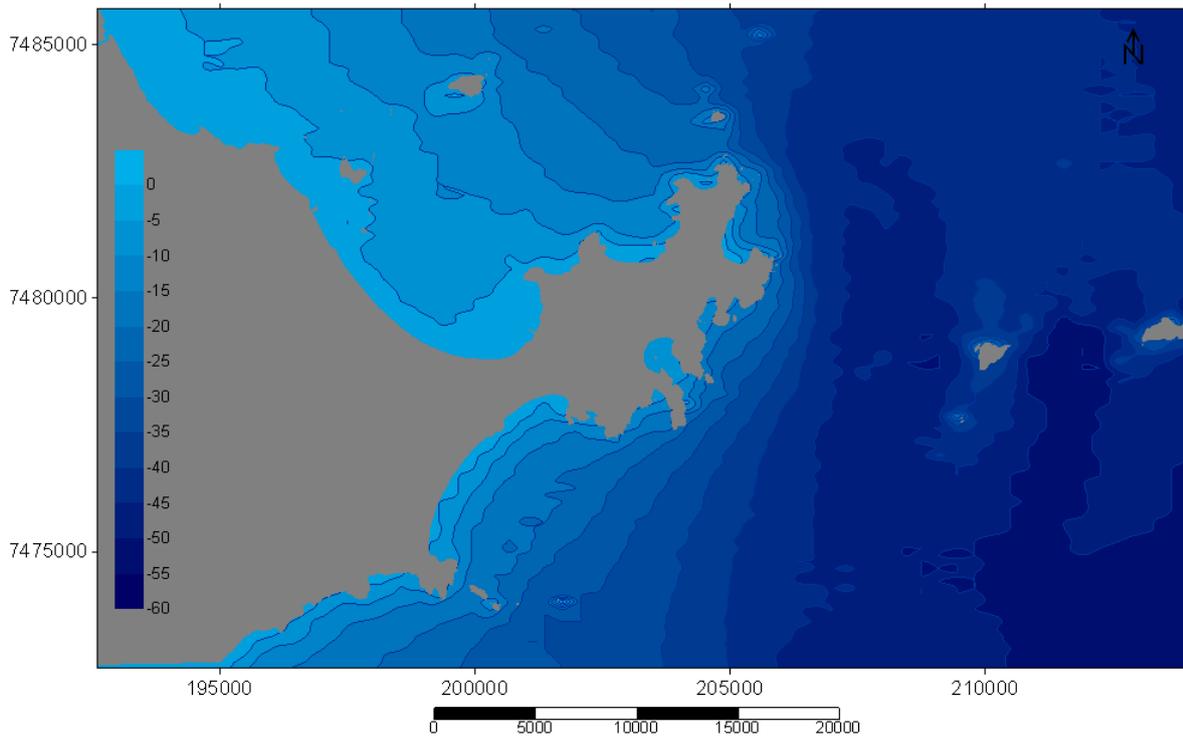


Figura 11. Interpolação usando o método *Triangulation with Linear Interpolation*.

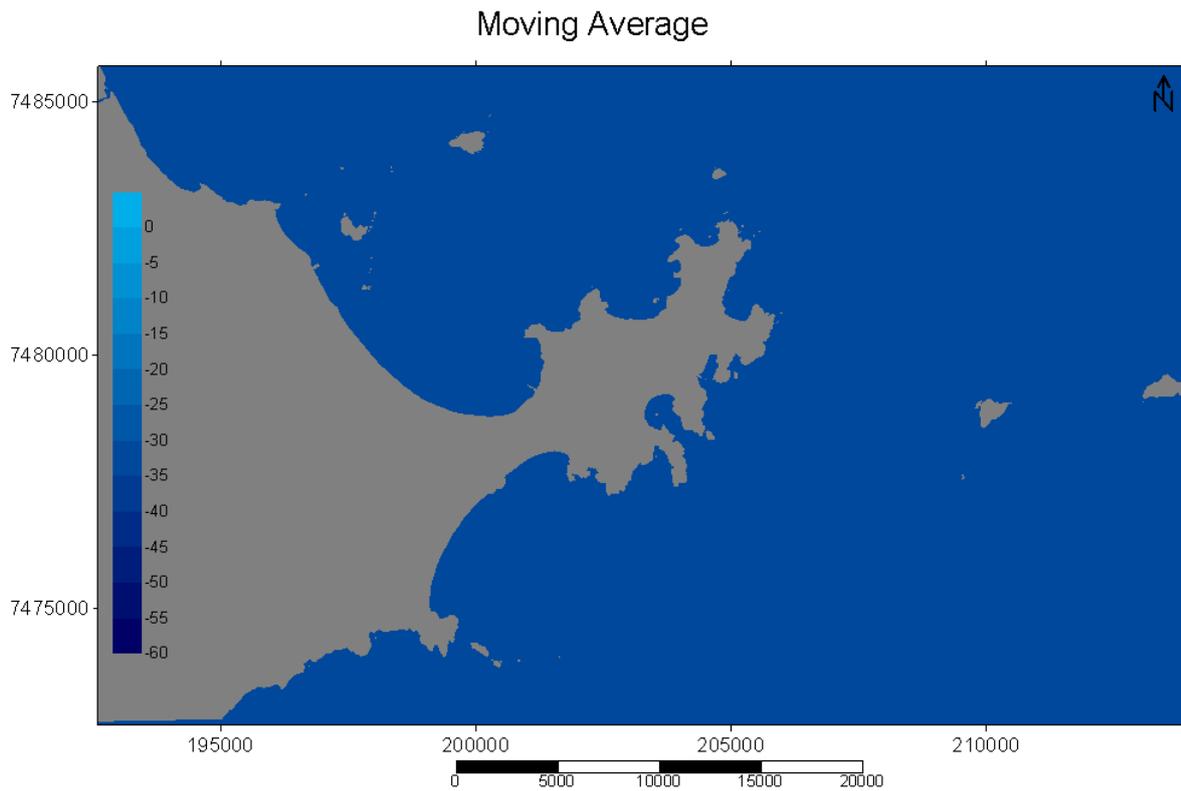


Figura 12. Interpolação usando o método *Moving Average*

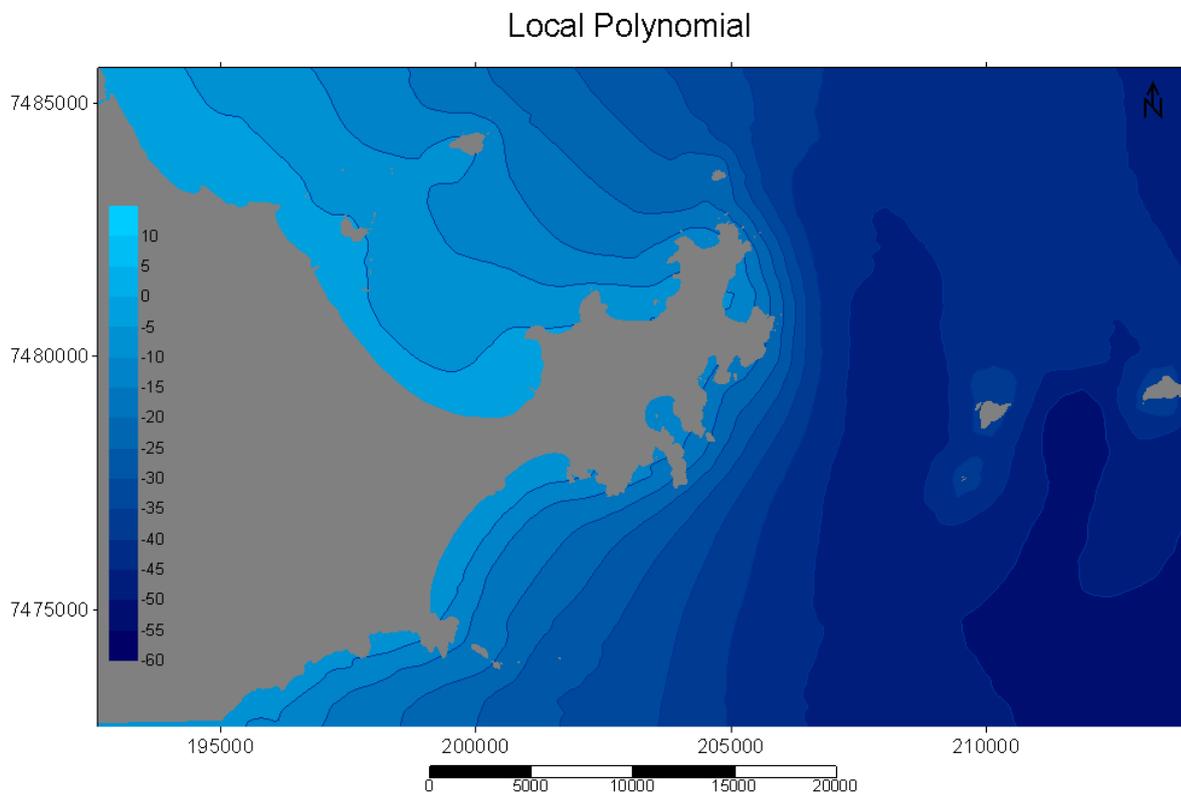


Figura 13. Interpolação usando o método *Local Polynomial*.

A tabela 01 a seguir exprime em termos quantitativos as diferenças entre as principais características dos interpoladores utilizados. Estas características são totais de nós produzidos e dentre estes os preenchidos e o percentual de não preenchidos. Os valores mínimos, médios e máximos das profundidades recalculadas. O alcance e o alcance médio dos dados, a média, o desvio padrão a variância e os coeficientes de variância e assimetria. A raiz quadrática e a média quadrada dos dados assim como o tempo de cálculo dos interpoladores.

Tabela 01. Parametrizações Estatísticas para cada um dos onze Métodos de Interpolação da Batimetria.

METHOD	TOTAL NODES	FILLED NODES	% UNFILLED NODES	Z MINIMUM	Z MEDIAN	Z MAXIMUM	MIDRANGE	RANGE
UNIVARIATE (NORMAL)	8717	8717	0	-56	-33	-0,4	-28,2	55,6
Inverse distance to a power	6200	6200	0	-54,55	-22,49	-1,2	-27,87	53,34
Kriging	6200	6200	0	-55,16	-22,45	8,957	-23,1	64,12
Polynomial regression	6200	6200	0	-47,78	-28,91	-10,05	-28,91	37,73
Minimum curvature	6200	6200	0	-55,25	-24,94	22,49	-16,38	77,75
Modified shepard's method	6200	4839	21,9516129	-55,2	-37,07	90,33	17,56	145,54
Moving average	6200	6200	0	-31,63	-31,48	-31,06	-31,34	0,56
Natural neighbour	6200	6200	0	-55,01	-22,67	-1	-28,01	54
Nearest neighbour	6200	6200	0	-55	-23	-0,6	-27,8	54,4
Radial basis function	6200	6200	0	-56,11	-22,51	23,81	-16,14	79,92
Triangulation w linear interpolation	6200	6200	0	-55	-22,68	-1	-28	54
Local polynomial	6200	6200	0	-103,72	-40,01	127,91	12,09	231,64

METHOD	MEAN	STD. DEVIATION	VARIANCE	COEF. VARIATION	COEF. SKEWNESS	ROOT MEAN SQUARE	MEAN SQUARE	ELAPSED TIME (S)
UNIVARIATE (NORMAL)	-29,55	16,72	279,56	-1	0,246	-	-	-
Inverse distance to a power	-24,98	18,5	342,52	-1	-0,084	31,09	966,64	1,95
Kriging	-23,61	20,15	406,254	-1	-0,00089	31,04	963,823	9,14
Polynomial regression	-28,91	8,56	73,31	-1	-1,0801	30,159	909,59	0,02
Minimum curvature	-28,36	15,7	246,58	-1	0,0041	32,41	1051,01	0,14
Modified shepard's method	-29,96	19,18	367,944	-1	1,1074	35,57	1265,897	1,52
Moving average	-31,45	0,11	0,014	-1	0,7869	31,45	989,683	1,61
Natural neighbour	-24,46	19,13	366,12	-1	-0,065	31,05	964,47	0,98
Nearest neighbour	-24	19,11	365,38	-1	-0,06	31,09	966,84	0,19
Radial basis function	-23,44	20,53	421,51	-1	0,057	31,165	971,26	176,7
Triangulation w linear interpolation	-24,45	19,14	366,67	-1	-0,063	31,06	964,881	0,39
Local polynomial	-31,05	31,72	1006,39	-1	0,979	44,39	1970,98	3,72

Fonte: Relatórios de Interpolação produzidos pelo *software Surfer 8.0*

Numa perspectiva comparativa o gráfico 01 apresenta os valores recalculados que representam as profundidades Z mínimo, Z médio e Z máximo após cada procedimento de interpolação. Os valores que aparecem sobre o eixo X seriam aqueles calculados com base na malha inicial dos dados sem nenhum método de interpolação, que seriam $Z_{m\acute{a}x} = -0,4$; $Z_{m\acute{e}d.} = -33$; e $Z_{m\acute{i}n.} = -56$. Observando o gráfico percebe-se que os interpoladores *Local Polynomial*, *Minimum Curvature*, *Kriging* e *Radial Basis Functions* geraram valores positivos para profundidades, num procedimento de extrapolação indesejável.

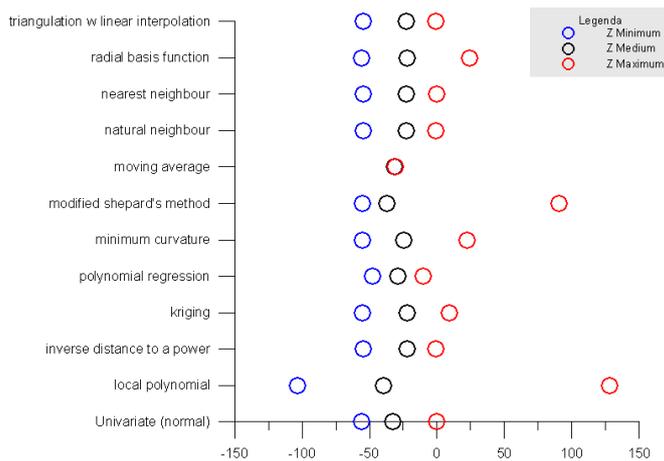


Gráfico 01. Valores de Z mínimos, médios e máximos calculados por todos os interpoladores.

No gráfico 02 os valores de alcance e médio-alcance (range and midrange) gerados pelos interpoladores destacam-se o Moving Average com o valor o gerando como mostrado no mapa uma superfície homogênea onde $Z_{min} = Z_{med} = Z_{max}$, o que também aparece no gráfico 01 anterior. Além deste os interpoladores *Local Polynomial* e *Modified Shepard's* apresentam valores de alcance muito destoantes dos valores aproximados em 50 apresentado pelo *Univariate*, procedimento de estatística sem interpolação.

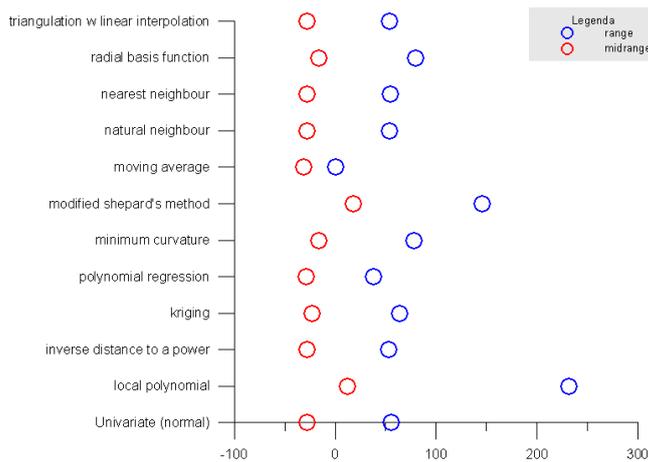


Gráfico 02. Range e Midrange resultantes calculados por todos os interpoladores.

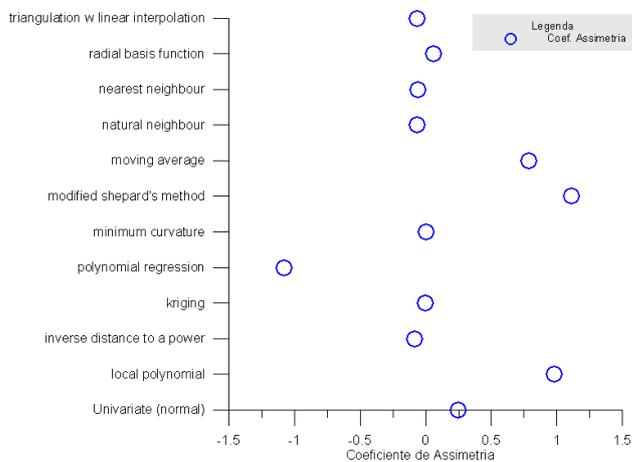


Gráfico 03. Coeficiente de Assimetria calculado por todos os interpoladores.

O cálculo do coeficiente de assimetria (gráfico 03, acima) calculado pela maior parte dos interpoladores foi muito próximo de 0, demonstrando então distribuição simétrica para os valores de Z. Apenas os interpoladores *Polynomial Regression*, *Modified Shepard*, *Moving Average* e *Local Polynomial* fugiram deste padrão. O primeiro para assimetria negativa, evidenciando uma tendência de valores positivos para Z. Os demais evidenciaram assimetria positiva, ou seja, para o lado dos valores negativos de Z o que de fato não é de todo mal em se tratando de profundidades.

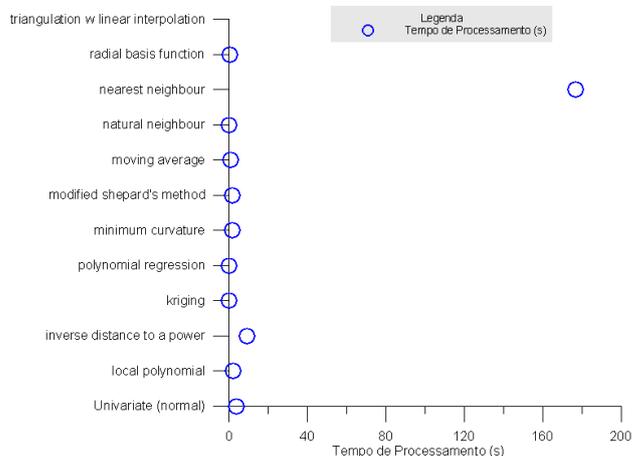


Gráfico 04. Tempo de Processamento utilizado por todos os interpoladores.

Outro parâmetro que pode evidenciar diferenças entre os interpoladores é o tempo de processamento (gráfico 04) gasto para a elaboração dos cálculos. No caso da batimetria todos foram muito semelhantes na ordem de poucos segundos. O único que destoou deste padrão foi o *Nearest Neighbour* que levou cerca de 180 s para os cálculos.

Resultados de Interpolação das Fácies Sedimentares

O resultado da interpolação dos valores de diâmetro mediano das fácies sedimentares utilizando o método *Inverse Distance to a Power* (figura 14) mostra uma série de discontinuidades na forma de *bull's eyes* para as áreas representadas em laranja e vermelho na porção central do mapa, justamente indicando as amostras de diâmetros médios, grossos e muito grossos que destoam da porção mais ao N do mesmo mapa onde há uma continuidade de frações siltsas (amarelo). O resultado apresentado por este interpolador não parece o ideal, porém, em caso de discontinuidades bem marcadas na malha amostral (ex. depósito de blocos rochosos aflorante em meio a areias finas ou siltes) estes tendem a sobresair. Porém como apresentado abaixo, torna-se um resultado poluído.

Inverse Distance to a Power

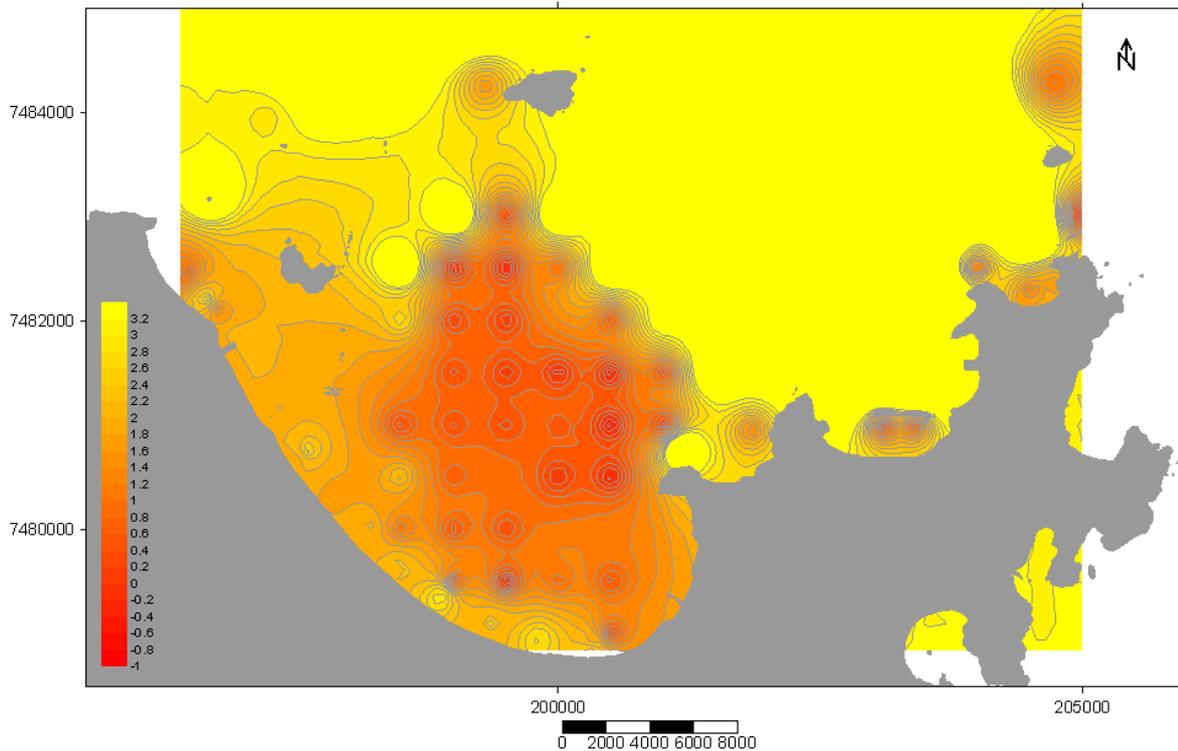


Figura 14. Interpolação usando o método *Inverse Distance to a Power*.

Os resultados apresentados pelo método de interpolação Krigagem (*Kriging*) na figura 15 abaixo aparentemente suavizam as nuances entre o depósito de siltes (amarelo) e a transição para os depósitos de areias médias, grossas e muito grossas (laranja e vermelho) na porção central do mapa. Por outro lado apresenta-se como uma transição abrupta entre estes depósitos o que indica de fato as características sedimentológicas locais. A presença de irregularidades (artefatos) neste mapa aparece na área destes depósitos mais grosseiros indicando uma certa modulação das frações (areias médias, grossas e muito grossas). Tanto neste interpolador como no anterior existe a extrapolação para áreas não amostradas e não desejáveis como por exemplo na porção extremo sudeste do mapa.

Os resultados da interpolação usando o método *Minimum Curvature* (figura 16) mostram áreas não interpoladas em branco (*blank*) por causa da ausência de dados para a interpolação. Isto mostra uma perspectiva mais limitada dos resultados da sedimentação. As demais nuances aparecem semelhantes aos dois métodos anteriores.

Os resultados da interpolação usando o método *Modified Shepard's* (figura 17) ressaltam as áreas onde faltam dados disponíveis para a interpolação na forma de áreas em branco (*blank areas*). Mesmo assim o padrão geral da sedimentação de siltes e areias médias a muito grossas ficam bem marcados. Este resultado não extrapolado para áreas fora de onde existem dados revelam a fragilidades de malhas não regularmente amostradas e nas áreas onde há amostragem, funciona como um interpolador exato, fidedigno aos dados iniciais.

O mapa da figura 18, aonde o método *Natural Neighbour* foi utilizado revela o perímetro no qual existem dados interpolados. Este método funciona como um interpolador típico, nem extrapolando para fora das áreas onde não existe amostragem, nem criando vazios (*blank*) nas áreas onde não há boa distribuição de informações. Trata-se então de um resultado útil pois reflete exatamente a área amostrada, ignorando e suavizando pequenas inconsistências na malha.

Kriging

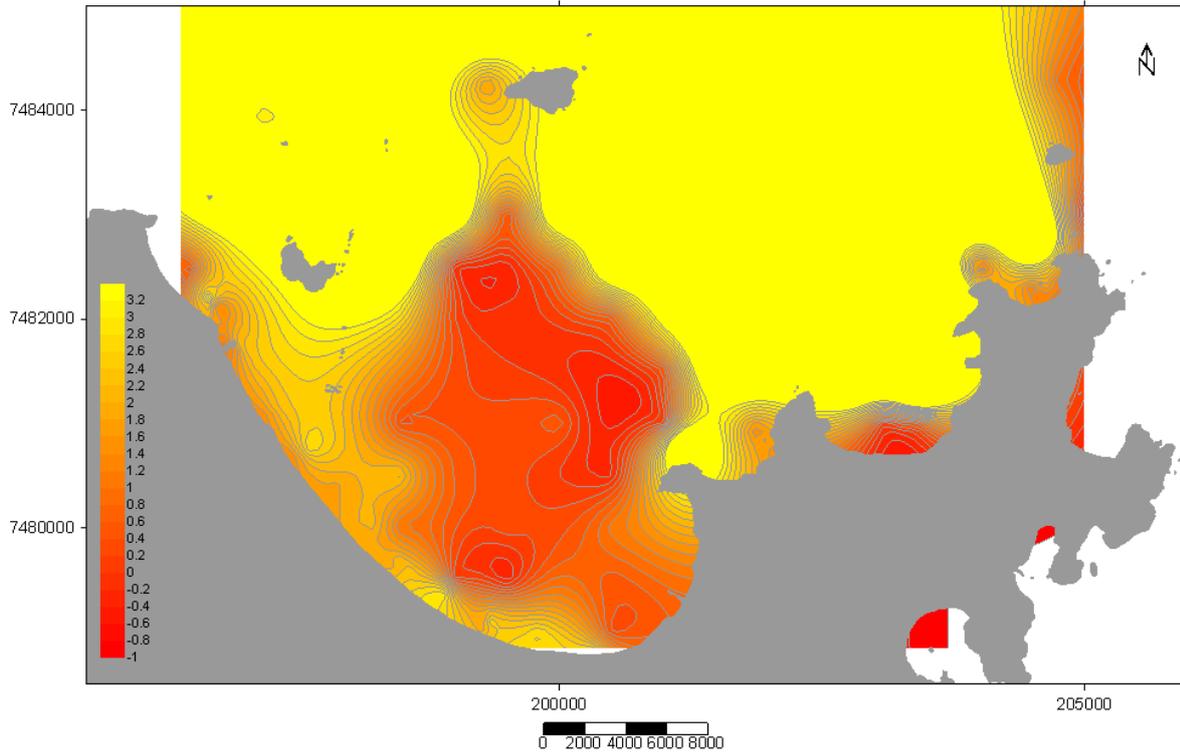


Figura 15. Interpolação usando o método *Kriging*

Minimum Curvature

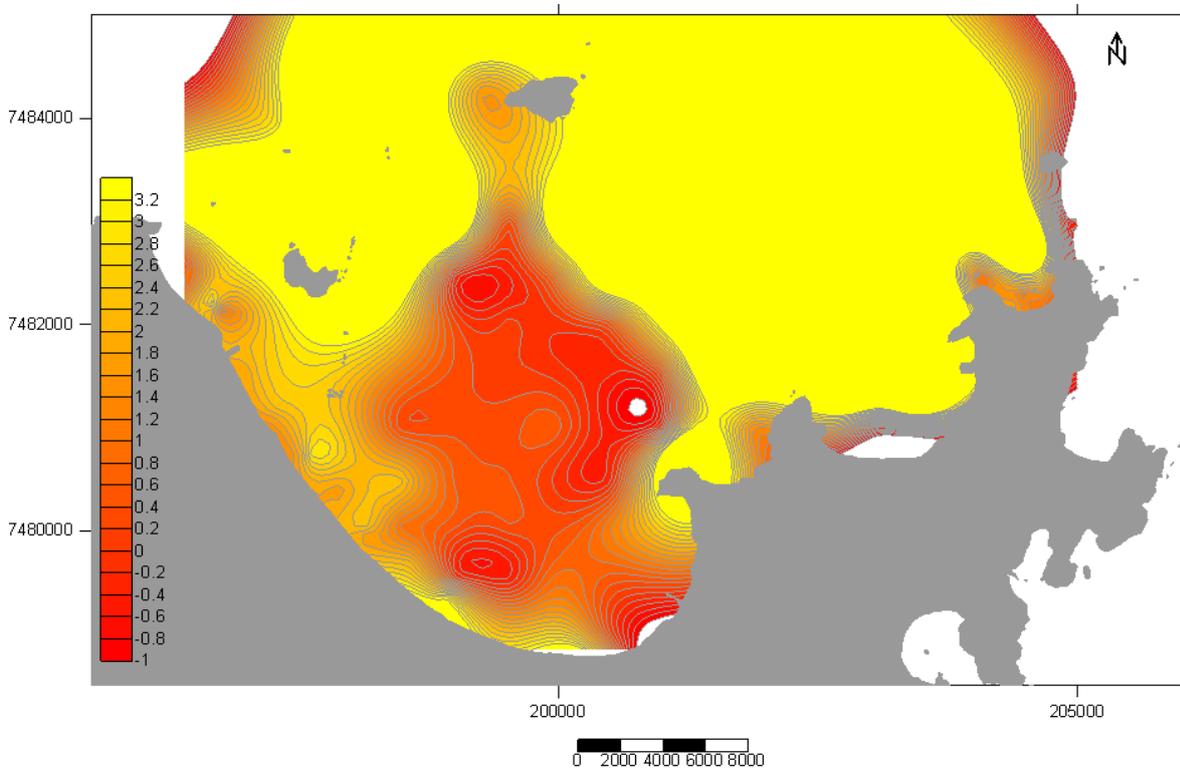


Figura 16. Interpolação usando o método *Minimum Curvature*.

Modified Shepard's Method

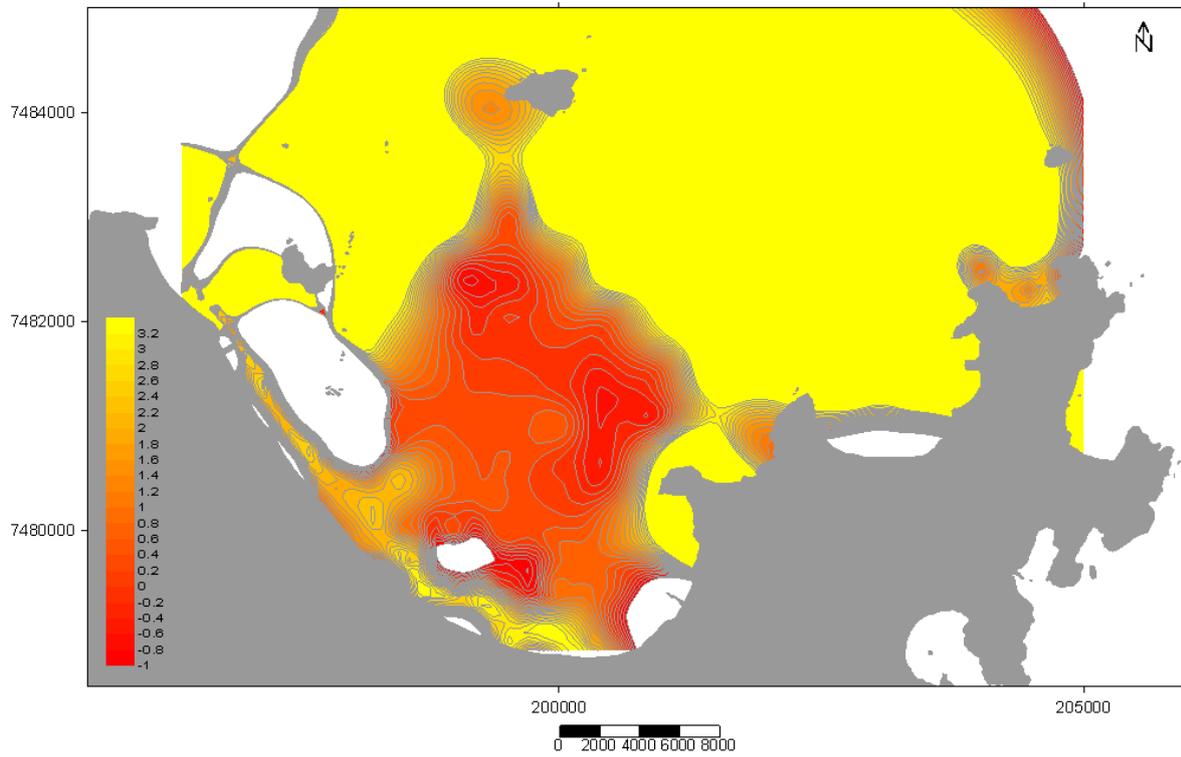


Figura 17. Interpolação usando o método *Modified Shepard's Method*.

Natural Neighbour

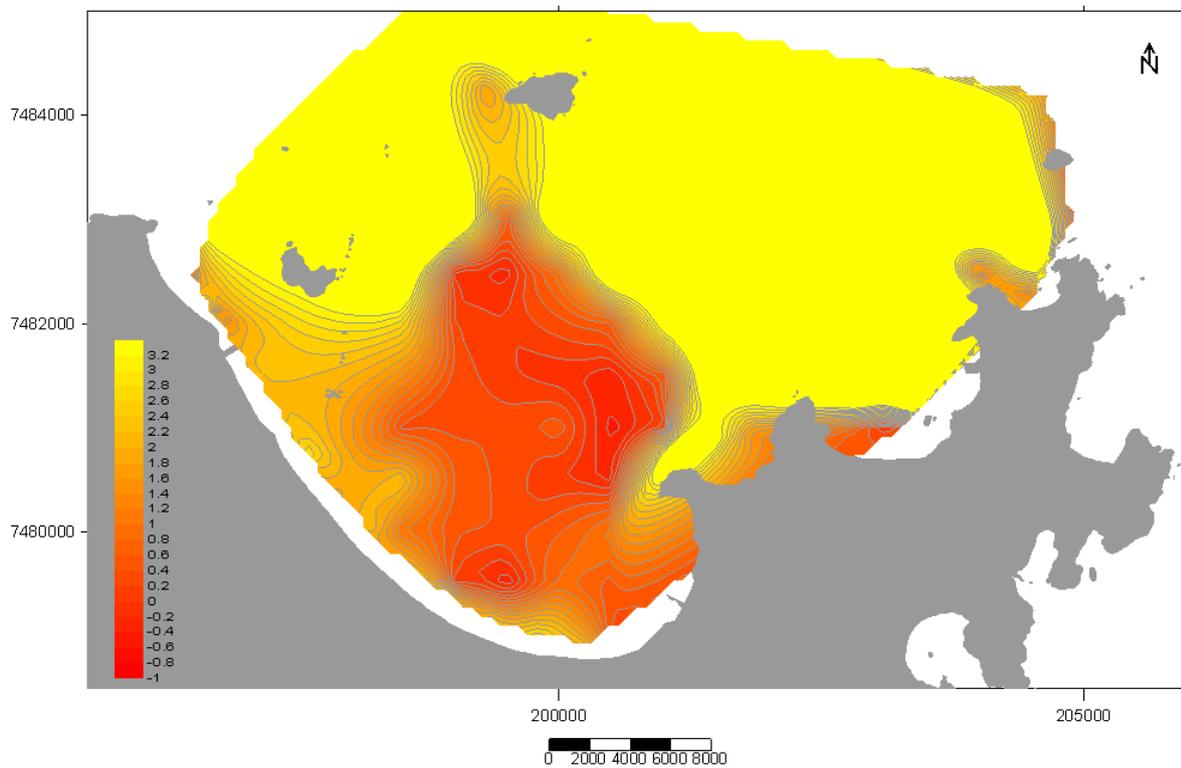


Figura 18. Interpolação usando o método *Natural Neighbour*.

Os resultados interpolados pelo método *Nearest Neighbour* (figura 19) revela uma modulação quadrática dos resultados. Não se trata de um bom interpolador para representação destes dados sedimentológicos visto que a área de influência das amostras dificilmente se dá com este padrão quadrangular. Além disso, este interpolador extrapola os resultados para áreas além da malha de coleta de dados, algo também não desejável.

Assim como mostrado nos resultados da batimetria, o interpolador *Polynomial Regression* (figura 20) tende a generalizar os resultados mostrando uma direção preferencial das alterações entre as classes granulométricas amostradas. Apesar de não refletir confiavelmente a distribuição das fácies sedimentares este interpolador de uma forma geral indica uma diminuição dos diâmetros médios granulométricos proporcional ao afastamento da linha de costa e ao mesmo tempo nos dá a idéia de que este fenômeno ocorre mais pronunciadamente na direção SSW - NNE, útil para uma caracterização generalista do depósito.

O resultado do interpolador *Radial Basis Function* (figura 21) que utiliza funções multiquadráticas mostra um resultado semelhante ao método da krigagem (*kriging*) excetuando-se pela produção de áreas em branco (*blank areas*) que revelam as irregularidades na malha amostral utilizada para a geração da retícula. De qualquer forma o depósito fica bem representado assim como a transição entre as classes granulométricas, não extrapolando os resultados.

Os resultados apresentados utilizando-se o método *Triangulation with Linear Interpolation* (figura 22) mostra a representação real da área do depósito não havendo extrapolação para as áreas circundantes. A transição entre as classes granulométricas aparecem bem delineadas porém a perspectiva triangular não reflete as nuances desta transição. Como é um método utilizado para representações em três dimensões, não é um método recomendado para a representação de fácies sedimentares já que os valores de Z não estão representando cotas nem de profundidade nem de elevação.

Os resultados apresentados para o método *Moving Average* (figura 23) não são satisfatórios pois não representam fidelidade aos valores da malha inicial de resultados. Estes resultados mostram-se extremamente suavizados excluindo por consequência os depósitos das frações mais grosseiras.

Por fim, os resultados representados pelo método *Local Polynomial* (figura 24) reflete uma suavização na transição das áreas de sedimentação siltosa (em amarelo) para áreas de sedimentação arenosa mais grosseira (laranja). Esta representação mostra tendências gerais do depósito que se torna mais fino a medida que se afasta da costa. Para áreas restritas (como a amostrada) este interpolador mostra-se pouco útil na medida em que exclui as nuances características deste depósito o que não minimiza sua potencialidade para utilização em áreas mais abrangentes.

Nearest Neighbour

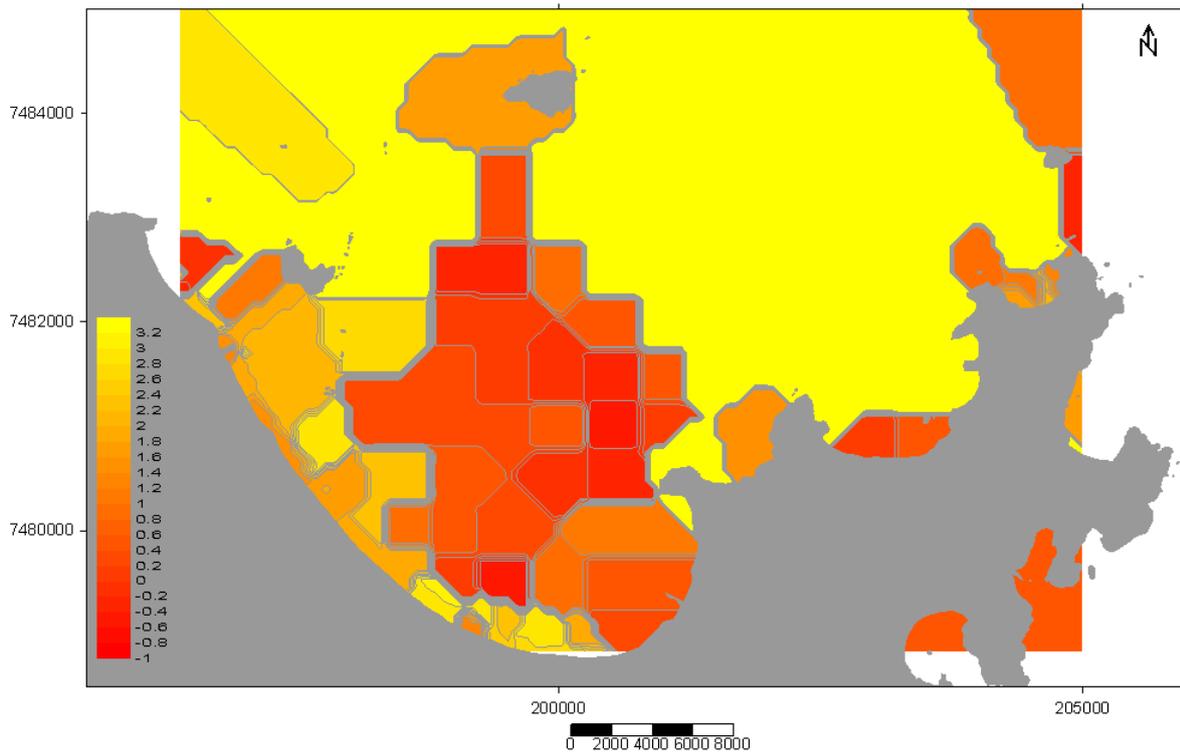


Figura 19. Interpolação usando o método *Nearest Neighbour*.

Polynomial Regression

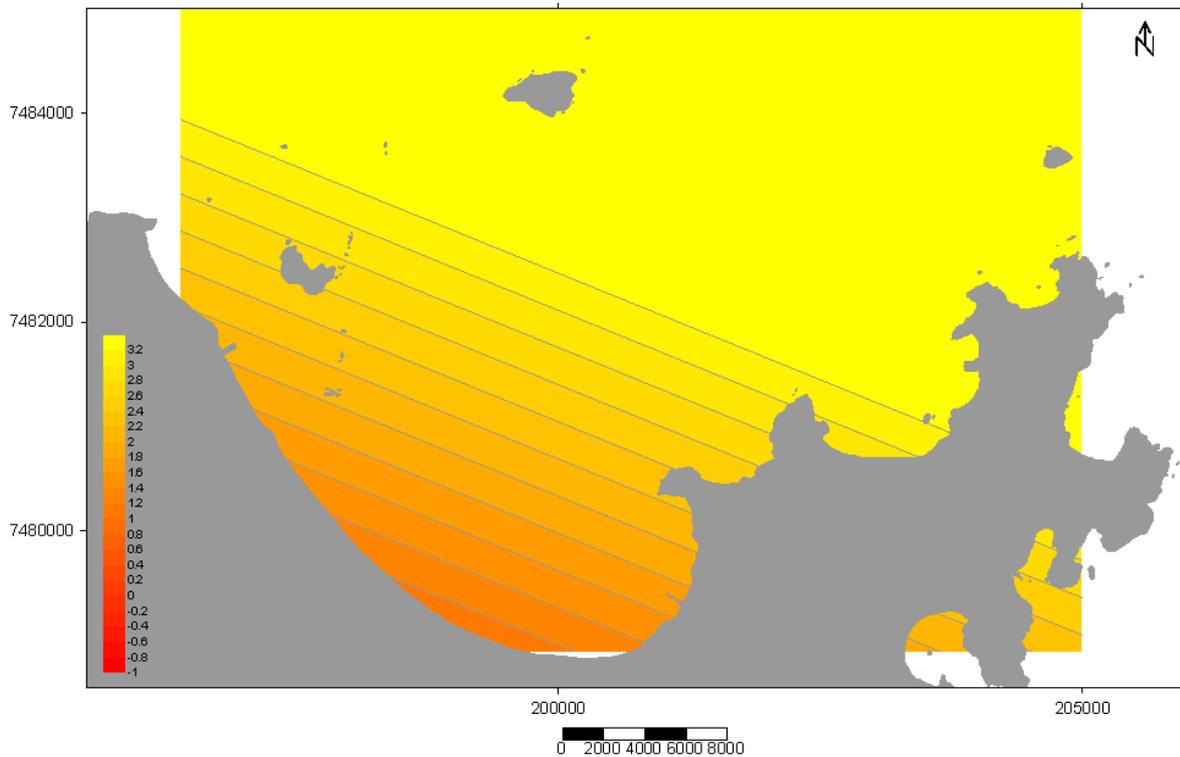


Figura 20. Interpolação usando o método *Polynomial Regression*.

Radial Basis Function

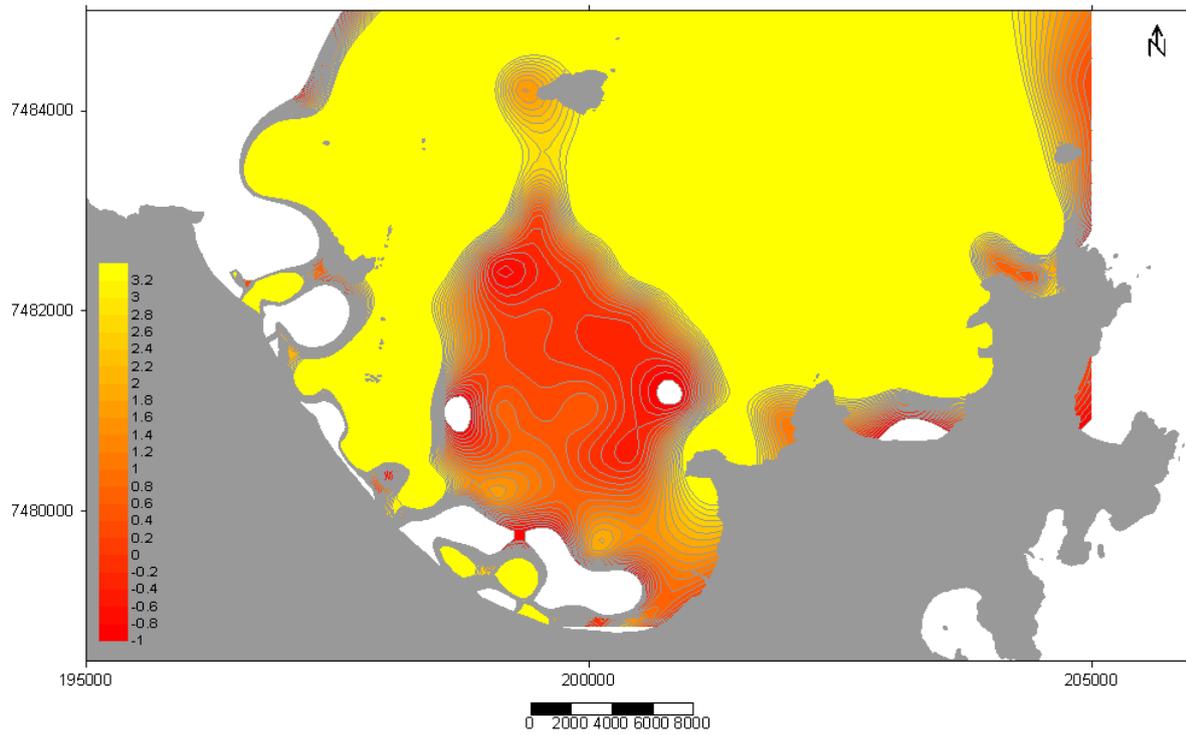


Figura 21. Interpolação usando o método *Radial Basis Function*.

Triangulation with Linear Interpolation

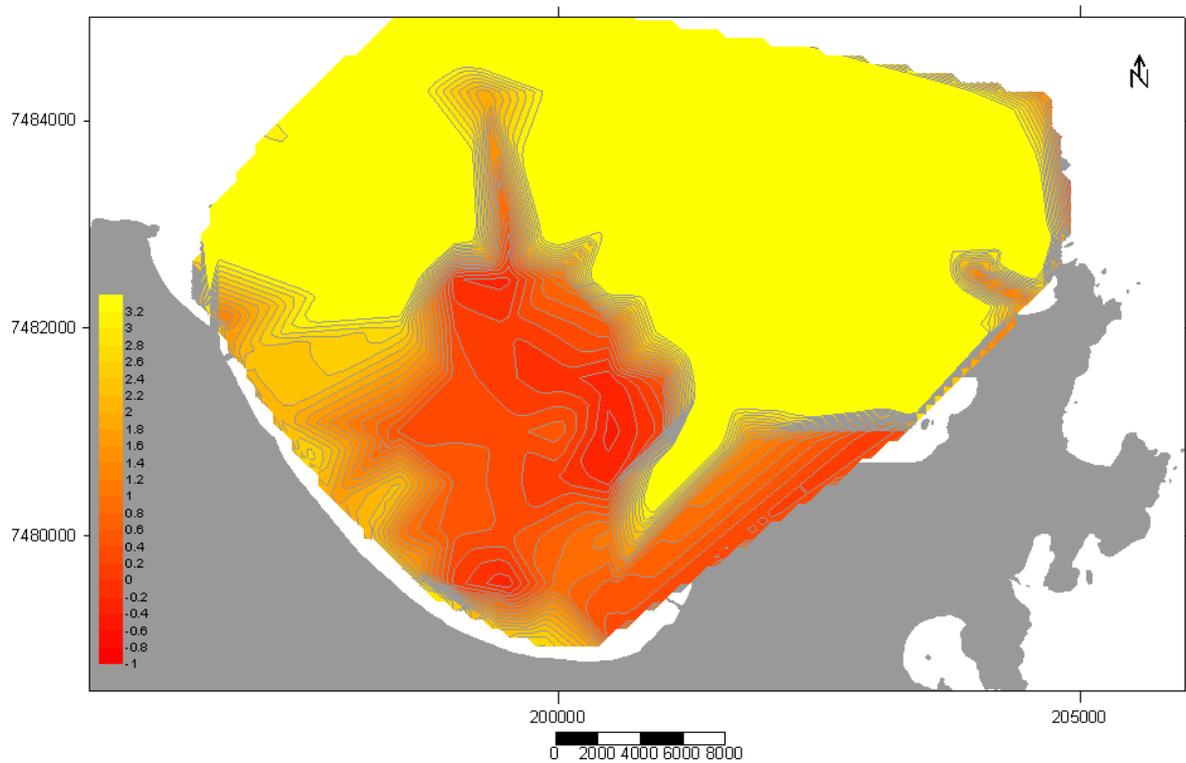


Figura 22. Interpolação usando o método *Triangulation with Linear Interpolation*.

Moving Average

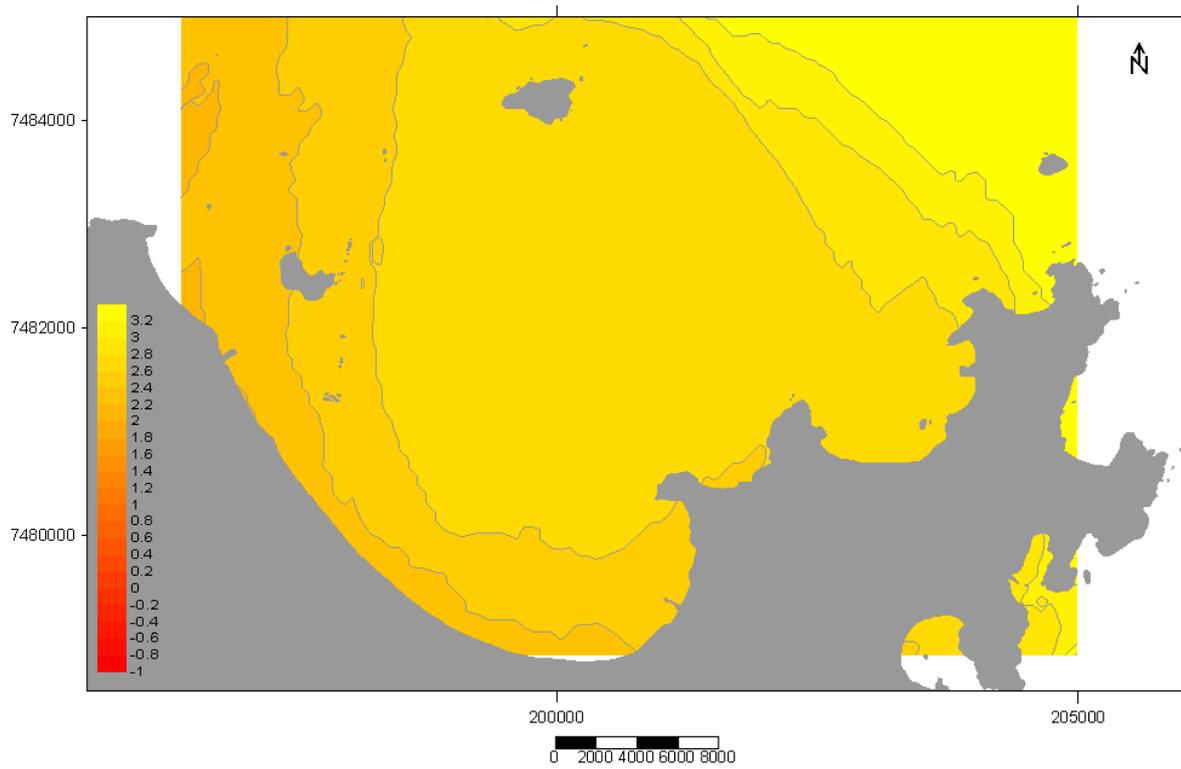


Figura 23. Interpolação usando o método *Moving Average*.

Local Polynomial

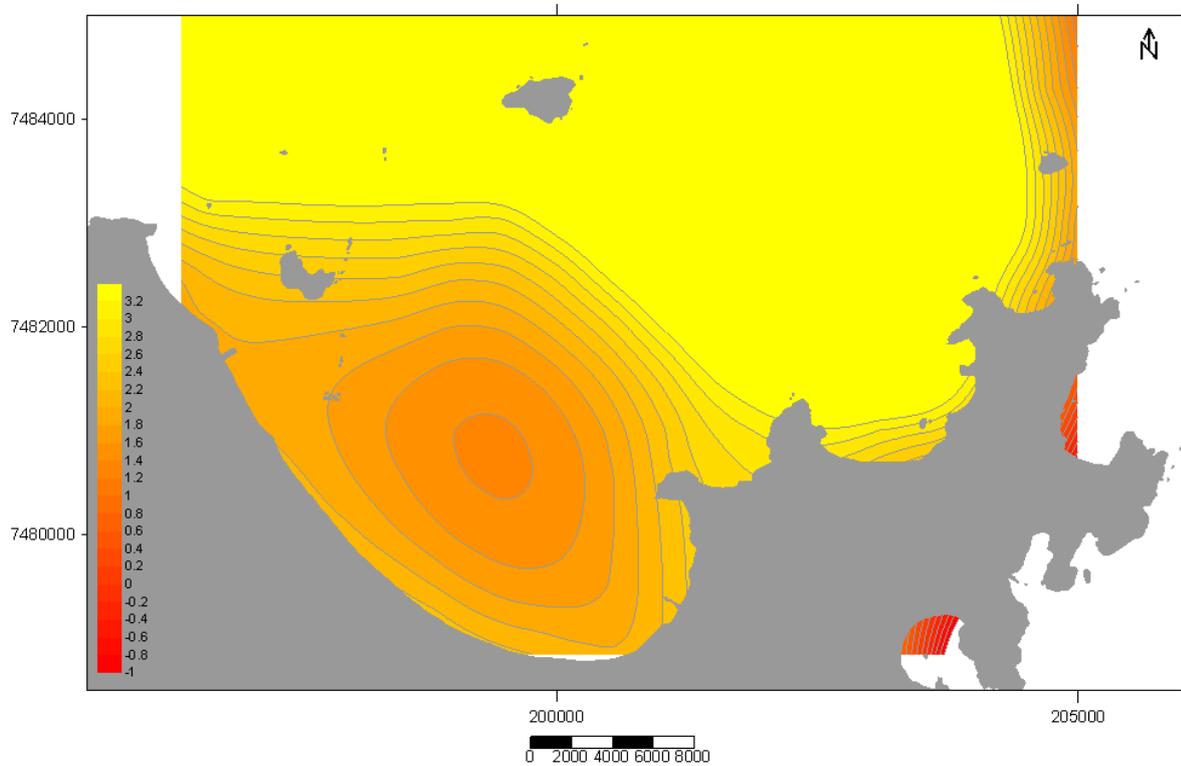


Figura 24. Interpolação usando o método *Local Polynomial*.

A tabela 02 a seguir exprime em termos quantitativos as diferenças entre as principais características dos interpoladores utilizados. Estas características são, total de nós produzidos e dentre estes os preenchidos e o percentual de não preenchidos. Os valores mínimos, médios e máximos das profundidades. O alcance e o alcance médio dos dados, a média, o desvio padrão a variância e os coeficientes de variância e assimetria. A raiz quadrática e a média quadrada dos dados assim como o tempo de cálculo dos interpoladores.

Tabela 02. Parametrizações Estatísticas para cada um dos onze métodos de Interpolação do Diâmetro Médio das Amostras Coletadas.

METHOD	TOTAL NODES	FILLED NODES	% UNFILED NODES	Z MINIMUM	Z MEDIAN	Z MAXIMUM	MIDRANGE	RANGE
Univariate (normal)	133	133	0	-0,491	2,173	6,636	3,0725	7,127
Inverse distance to a power	7700	7700	0	-0,46	3,12	6,61	3,07	7,08
Kriging	7700	7700	0	-1,48	2,76	6,81	2,66	8,3
Radial basis function	7700	7700	0	-102,9	2,55	39,48	-31,71	142,38
Minimum curvature	7700	7700	0	-28,26	2,65	8,65	-9,8	36,91
Modified shepard's method	7700	7356	4,467532468	-560,65	2,94	108,39	-226,13	669,04
Moving average	7700	7700	0	1,62	4,49	2,64	3,05	2,87
Natural neighbour	7700	4747	38,35064935	-0,44	3,77	6,62	3,08	7,07
Nearest neighbour	7700	7700	0	-0,491	2,276	6,636	3,07	7,127
Polynomial regression	7700	7700	0	0,33	3,167	5,99	3,167	5,66
Triangulation w linear interpolation	7700	4913	36,19480519	-0,45	3,74	6,62	3,08	7,08
Local polynomial	7700	7700	0	-8,19	2,87	7,34	-0,42	15,54

METHOD	MEAN	STD. DEVIATION	VARIANCE	COEF. VARIATION	COEF. SKEWNESS	ROOT MEAN SQUARE	MEAN SQUARE	ELAPSED TIME (S)
Univariate (normal)	2,64	2,15	4,64	0,814	0,44	-	-	-
Inverse distance to a power	3,21	1,55	2,41	0,48	0,13	3,57	12,77	0,59
Kriging	2,96	2,37	5,61	0,798	-0,0044	3,79	14,42	0,14
Radial basis function	-1,63	16,65	277,36	-1	-3,419	280,04	280,04	0,5
Minimum curvature	2,07	4,6	21,17	2,214	-1,98	5,04	25,49	1,95
Modified shepard's method	-4,73	33,15	1099,49	-1	-5,94	33,4955	1121,94	0,03
Moving average	2,69	0,393	0,1544	0,14	1,002	2,72	7,43	0,02
Natural neighbour	3,41	2,15	4,65	0,63	-0,16	4,04	16,34	0,27
Nearest neighbour	3,12	2,47	6,14	0,79	0,14	3,98	15,91	0,09
Polynomial regression	3,167	1,22	1,49	0,38	-5,21	3,39	11,52	0,01
Triangulation w linear interpolation	3,4	2,21	4,92	0,65	-0,155	4,06	16,54	0,02
Local polynomial	3,21	1,92	3,68	0,59	-0,57	3,74	14,04	1,25

Fonte: Relatórios de Interpolação produzidos pelo *software Surfer 8.0*

Numa perspectiva comparativa o gráfico 05 apresenta os valores recalculados que representam os diâmetros médios Z mínimo, Z médio e Z máximo após cada procedimento de interpolação. Os valores que aparecem sobre o eixo X são aqueles calculados com base na malha inicial dos dados sem nenhum método de interpolação, que são $Z_{\max}=6,636$; $Z_{\text{méd.}}=2,173$; e $Z_{\text{mín.}}=-0,491$. Observando o gráfico 06 abaixo percebe-se que os interpoladores *Modified Shepard's Method* e *Polynomial Regression* geraram valores bastante destoantes para Z máx e Z mín.

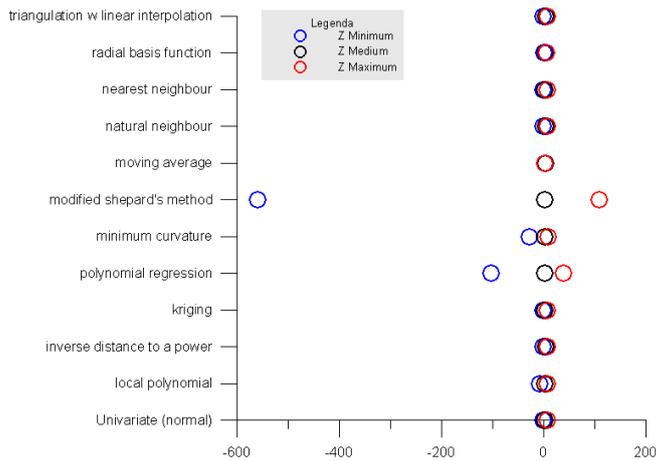


Gráfico 05. Valores Mínimos, Médios e Máximos de Z para todos os interpoladores.

O Desvio Padrão (gráfico 06) dos valores de Z aparecem elevados nos interpoladores *Modified Shepard's Method*, *Polynomial Regression* e *Minimum Curvature* evidenciando uma extrapolação não desejável para dados de diâmetro granulométrico.

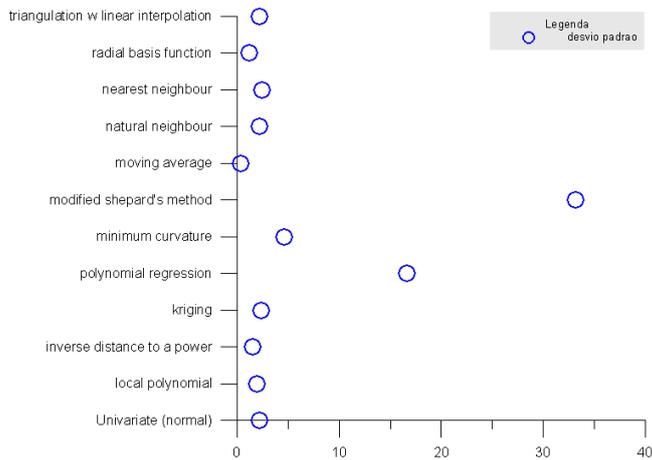


Gráfico 06. Desvio padrão dos valores de Z calculados por todos os interpoladores.

Já o tempo de processamento (gráfico 07) dos resultados apresentou diferenças pouco significativas entre os interpoladores em intervalos entre 0,1 e 2 segundos.

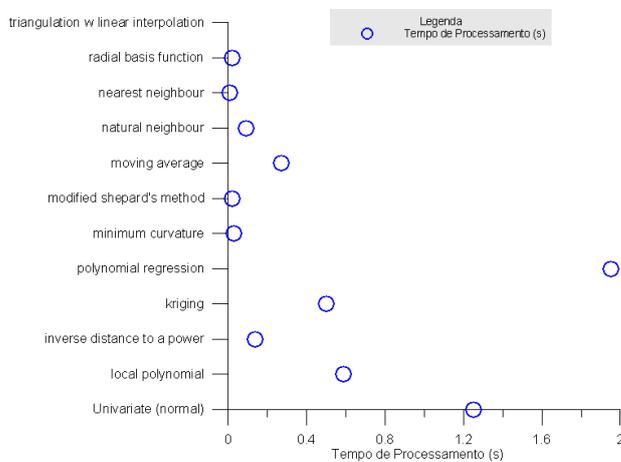


Gráfico 07. Tempo de processamento usado para o calculo por todos os interpoladores.

CONCLUSÕES

Numa perspectiva comparativa analítica entre os interpoladores foram observadas características como o recálculo dos valores de Z máximo, médio e mínimo, desvio padrão e tempo de processamento dos cálculos de interpolação e ainda foram observadas as suavidades e a interpretatividade dos resultados plotados nos mapas, além de observadas as características e as relativas vantagens e desvantagens de cada um dos interpoladores.

Para os dados batimétricos as melhores representações do recálculo de interpolação e extrapolação dos dados de profundidades foram o *Kriging*, o *Natural Neighbour*, o *Triangulation with Linear Interpolation* e o *Local Polynomial*, sendo este último o visualmente mais agradável. Contudo considerando os valores absolutos para Z apenas o *Natural Neighbour* e o *Triangulation with Linear Interpolation* se mostraram satisfatórios pois não extrapolaram valores de profundidade para números positivos (o que a princípio não é algo desejável). Os outros interpoladores ou apresentaram resultados visualmente muito poluídos ou valores de Z muito destoantes no recálculo da malha amostral.

Para os dados faciográficos, considerando o diâmetro médio dos sedimentos de fundo, as representações que melhor apresentam os resultados foram o *Kriging*, o *Natural Neighbour* e o *Local Polynomial*, que de sobremaneira honraram todo o perímetro de interpolação (o primeiro e o terceiro extrapolando, o que neste caso é algo desejável). Dentre estes em termos do recálculo dos diâmetros granulométricos (valores de Z) o *Kriging* foi o método que se situou mais próximo dos valores originais honrando com melhor precisão os resultados da malha amostral. Fica aqui uma recomendação sobre o uso do interpolador *Inverse Distance to a Power* para a representação de distribuição de sedimentos de fundo. Quando houver uma determinada classe (cascalho, blocos rochosos, depósitos biodetríticos) que se deseja destacar numa determinada área este interpolador o faz de forma desejável já que como método ele tende a representar de maneira destacada as proximidades de influência de uma determinada classe justamente por dar maior peso aos nós (pontos) próximos daqueles amostrados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- FERNANDEZ, G.B. Morfologia e Dinâmica do Sistema Praia-Duna Frontal e Antepraia em Ambiente de Alta Energia. Praia da Massambaba Leste, Litoral do Estado do Rio de Janeiro. 2003. 140f. Tese de Doutorado. PPGG-UFRJ. Rio de Janeiro.
- LANDIM, P. M.B. Análise Estatística de Dados Geológicos. 2a. Edição. Editora da UNESP. São Paulo. 2003. 253 p.
- MUEHE, D. O Litoral Brasileiro e sua Compartimentação. In: CUNHA, S.B. & GUERRA, A.J.T. (organizadores) Geomorfologia do Brasil. 3a. Edição (2003). Editora Bertrand Brasil. Rio de Janeiro. 1998. p. 273-250.
- SAAVEDRA, L. Dinâmica Sedimentar na Plataforma Continental Interna entre a Ilha do Cabo Frio e Cabo Búzios - RJ. 1994. 125f. Dissertação de Mestrado. PPGG/UFRJ. Rio de Janeiro.
- SAAVEDRA, L.; MUEHE, D. Dinamica Sedimentar na Plataforma Continental Interna entre a Ilha do Cabo Frio e Cabo Búzios - RJ. In: ANAIS DO XXXVIII CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, Santa Catarina, 1994, p.370-371.
- SURFER 8. User's Guide: Contouring and 3D Surface Mapping for Scientists and Engineers, Golden Software, Inc. 2002. 639p.