



**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
FACULDADE DE OCEANOGRAFIA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

RUDNEY RENNAN COSTA LIMA

**COMPARAÇÃO DE MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO PARA ANÁLISE
DE DADOS BATIMÉTRICOS**

**BELÉM - PARÁ
2011**

RUDNEY RENNAN COSTA LIMA

**COMPARAÇÃO DE MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO PARA ANÁLISE
DE DADOS BATIMÉTRICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de
Oceanografia do Instituto de
Geociências da Universidade
Federal do Pará, para obtenção do
título de Bacharel em Oceanografia.
Orientadora: Prof^a. Msc. Susane
Rabelo de Souza -Vieira.

BELÉM / PA
2011

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Biblioteca Geólogo Raimundo Montenegro Garcia de Montalvão

L732c Lima, Rudney Rennan Costa

Comparação de métodos de interpolação para análise de dados batimétricos / Rudney Rennan Costa Lima; Orientador: Susane Rabelo de Souza Vieira – 2011

83 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação em oceanografia) – Faculdade de Oceanografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, Terceiro Período de 2011.

1. Métodos de interpolação. 2. Estuário do Caeté. 3. Krigagem. I. Vieira, Susane Rabelo de Souza, *orient.* II. Universidade Federal do Pará. III. Título.

CDD 20 ed.: 511.42

RUDNEY RENNAN COSTA LIMA

COMPARAÇÃO DE MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO PARA ANÁLISE DE DADOS
BATIMÉTRICOS.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
à Faculdade de Oceanografia do Instituto de
Geociências da Universidade Federal do
Pará, para obtenção do título de Bacharel em
Oceanografia.

Data de defesa: 02 / 08 / 2011

Conceito: Bom

Banca Examinadora:

Susane Rabelo de Souza-Vieira

Prof.^a Susane Rabelo de Souza-Vieira - Orientadora
Mestre em Oceanografia Física, Química e Geológica
Universidade Federal do Pará

Elma Costa Oliveira

Prof.^a Elma Costa Oliveira - Membro
Mestre em Geologia e Geoquímica
Universidade Federal do Pará

Silvana Veloso Sodré

Prof.^a Silvana do Socorro Veloso Sodré - Membro
Mestre em Ciências Ambientais
Universidade Federal do Pará

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente, à Deus, que me deu forças para conseguir concluir este trabalho e sem o qual, não teria obtido tantas conquistas.

À minha orientadora Susane Rabelo, que mesmo com o tempo apertado aceitou me orientar e forneceu todo o auxílio necessário para a conclusão deste trabalho. Meu muito obrigado.

Aos meus pais, que sempre apoiaram minhas decisões e empregaram todos os esforços possíveis para que eu obtivesse uma boa educação.

À minha irmã Vanessa, pelos vários momentos de apoio e amizade .

Agradeço também aos meus grandes amigos, que sempre deram apoio nas atividades e proporcionaram vários momentos de descontração fora e dentro do ambiente da universidade: Denyson Rodrigo (Cajú), Deyvison Àlex, Fábio Watanabe (japonês), Márcio Porfírio e Robert Diego.

À minha amiga Sury Monteiro, por ter me apresentado o curso e pelo auxílio dado.

Ao Gustavo, pelos esclarecimentos acerca do Surfer.

Aos amigos da Paratur pela companhia ao longo destes 3 últimos anos e às minhas chefias pelas várias oportunidades dadas para participação em atividades da universidade.

À minha esposa, Anny Karoline, pelo companheirismo e constante apoio, que em momentos de muita preocupação da minha parte, sempre soube ter as palavras certas para me tranquilizar.

E à todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Os estuários são ambientes sedimentares costeiros cuja evolução está relacionada à interação entre parâmetros sedimentares, hidráulicos e os aspectos morfológicos. Muitos estudos atuais abordam a modelagem destes ambientes, por meio de modelos digitais de elevação, pois através da aplicação destes modelos para o estudo, é possível obter uma visão dinâmica dos processos que ocorrem nestes complexos sistemas, que são os estuários. O estuário do rio Caeté, alvo deste estudo, está localizado na região costeira Bragantina, inserida no litoral NE do estado do Pará. Possui 100 km de extensão, com uma largura entre as margens de 100 m, nas proximidades da cidade de Bragança, alargando-se gradualmente até 12 km em sua foz. Foram testados 12 métodos de interpolação, utilizando dados de batimetria coletados neste estuário, com o objetivo de avaliar qual método caracterizaria melhor a área de estudo. Os métodos de interpolação são necessários para que se possa estimar os valores de pontos não amostrados, em determinada área. Para se alcançarem os objetivos deste estudo, algumas etapas foram seguidas. Primeiro, um levantamento bibliográfico, depois o uso do programa Surfer 9 em conjunto com o programa Global Mapper 10. A geração do mapa final foi obtida através do método da Krigagem, que se mostrou o mais adequado para caracterizar o estuário e foi mais fiel aos dados originais. A morfologia também pode ser visualizada, revelando barras arenosas ao longo do estuário.

Palavras chave: Métodos de interpolação. Estuário do Caeté. Krigagem.

ABSTRACT

Estuaries are coastal sedimentary environments whose evolution is related to the interaction between sedimentary parameters, hydraulic and morphological aspects. Many current studies address the modeling of these environments through digital elevation models, because by applying these models to the study, it is possible to obtain a dynamic view of the processes occurring in these complex systems, which are the estuaries. The estuary of the river Caeté aim of this study, is located in the coastal Bragançina inserted on the coast (NE) of the state of Pará. It is 100 km long with a width between margins of 100 m, near the city of Bragança, widening gradually to 12 km at its mouth. Were tested twelve interpolation methods, using bathymetric data collected in this estuary, in order to assess which method best characterizes the area of study. The interpolation methods are needed to estimate the values of unsampled points in a certain area. To achieve the objectives of this study, some steps have been followed. First, a literature review, after using the software Surfer 9 together with the software Global Mapper 10. The generation of the final map was obtained using the Kriging method, which proved to be the most appropriate to characterize the estuary and was more faithful to the original data. The morphology can also be viewed, revealing sandy bars along the estuary.

Keywords : Interpolation methods. Caeté estuary. Kriging.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Mapa de localização da área de estudo.....	17
Figura 2	Duração da insolação na Estação Meteorológica de Tracuateua (1975-1987)....	18
Figura 3	Descarga de água doce ($m^3 s^{-1}$) e precipitação na estação de Tracuateua dentro da Baía de Caeté.....	19
Figura 4	Mapa de vegetação da Planície Costeira Bragantina.....	20
Figura 5	Distribuição de A) tipos de energia, B) elementos morfológicos em visão plana e C) fácies sedimentares em seção longitudinal em um estuário dominado por maré idealizado.....	24
Figura 6	A) Zonação de fácies no estuário Baía Cobequid - Rio Salmon (Canadá), dominado por maré. A linha tracejada, na Baía Cobequid, marca o limite externo do corpo arenoso estuarino. B) Porção interna do estuário, em escala maior, mostrando as mudanças longitudinais na morfologia do canal e nos tipos de barras.....	25
Figura 7	Mapa da parte interna do estuário South Alligator River, mostrando o padrão de canal retilíneo-meandrante-retilíneo.....	26
Figura 8	Pontos de amostragem (1 a 7) e de estimativa (x) numa área de estudo.....	27
Figura 9	Malhas de amostragem, da esquerda para direita: Aleatória, agrupada e regular.	28
Figura 10	Interpolação usando distância inversa ao quadrado.....	29
Figura 11	Interpolação com uso do método de Krigagem.....	30
Figura 12	Interpolação utilizando Curvatura mínima.....	31
Figura 13	Interpolação através do método de Shepard modificado.....	32
Figura 14	Interpolação utilizando o método “vizinho natural”.....	32
Figura 15	Interpolação utilizando “Vizinho mais próximo”.....	33
Figura 16	Superfície de 1º grau, calculada pelo algoritmo “regressão polinomial”.....	34
Figura 17	Exemplo de Interpolação utilizando o método de função da base radial.....	35
Figura 18	Triangulação com interpolação linear.....	36
Figura 19	Interpolação utilizando Média móvel.....	36
Figura 20	Mapa gerado através do interpolador Dados métricos.....	37
Figura 21	Interpolação usando Polinômio local.....	38
Figura 22	Perfilagem batimétrica e espaçamento entre perfis.....	45
Figura 23	Padrão morfológico do estuário do rio Caeté comparado com a morfologia do estuário dominado por maré estabelecido por Dalrymple et al (1992).....	48
Figura 24	Fluxograma demonstrando a metodologia seguida.....	49
Figura 25	Mapa de contorno gerado através do “Inverso da distância”. Escala em metros.	51
Figura 26	Mapa de contorno gerado pelo método da Krigagem. Escala em metros.....	52
Figura 27	Mapa de contorno obtido através do método Mínima curvatura. Escala em metros.....	53
Figura 28	Método de Shepard modificado aplicado ao grid. Escala em metros.....	54

Figura 29	Linhas de contorno geradas pelo método “vizinho natural”. Escala em metros...	55
Figura 30	Mapa de contorno gerado pelo método de interpolação “vizinho mais próximo”. Escala em metros.....	56
Figura 31	Mapa de contorno gerado pela regressão polinomial. Observa-se um padrão de linhas paralelas apenas. Escala em metros.....	57
Figura 32	Grid gerado pelo interpolador função da base radial. Escala em metros.....	58
Figura 33	Mapa gerado pelo interpolador “triangulação com interpolação linear”. Escala em metros.....	59
Figura 34	Mapa gerado através do método “média móvel”. Escala em metros.....	60
Figura 35	Grid gerado através do interpolador “Dados métricos”. Escala em metros.....	61
Figura 36	Mapa de contorno gerado através do método “Polinômio local”. Escala em metros.....	62
Figura 37	Mapa de contorno gerado pelo método “Inverso da distância”, com aplicação de resolução de 5 metros. Escala em metros.....	63
Figura 38	Mapa de contorno gerado através do interpolador Krigagem, aplicando resolução de 5 metros. Escala em metros.....	64
Figura 39	Mapa de contorno gerado através do interpolador “Minima curvatura”, com resolução de 5 metros. Escala em metros.....	65
Figura 40	Mapa de contorno gerado através do interpolador “Vizinho mais próximo”, com resolução de 5 metros. Escala em metros.....	66
Figura 41	Mapa de contorno gerado através do interpolador “Triangulação com interpolação linear”, com resolução de 5 metros. Escala em metros.....	67
Figura 42	Setorização do estuário, obedecendo ao espaçamento da perfilagem.....	68
Figura 43	Diferentes resoluções aplicadas usando a Krigagem, para o estuário superior. Escala em metros.....	70
Figura 44	Diferentes resoluções aplicadas usando a Krigagem, para o estuário médio. Escala em metros.....	72
Figura 45	Diferentes resoluções aplicadas usando a Krigagem, para o estuário inferior. Escala em metros.....	74
Figura 46	Mapa final, gerado pela Krigagem. A morfologia do estuário pode ser observada, para cada setor do estuário.....	78

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 -	Características da Regressão Polinomial.....	38
TABELA 2 -	Características do Inverso da distância.....	39
TABELA 3 -	Características da Curvatura Mínima.....	40
TABELA 4 -	Características da Krigagem.....	41
TABELA 5 -	Características da Triangulação com Interpolação Linear.....	43
TABELA 6 -	Características do método Vizinho mais próximo.....	44
TABELA 7 -	Comparação entre algoritmos.....	44
TABELA 8 -	Valores mínimos e máximos de cada interpolador após geração do grid.....	63
TABELA 9 -	Resultados estatísticos para o estuário superior.....	69
TABELA 10 -	Resultados estatísticos para o estuário médio.....	71
TABELA 11 -	Resultados estatísticos para o estuário inferior.....	73

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	JUSTIFICATIVA.....	14
2	OBJETIVOS.....	16
2.1	GERAL.....	16
2.2	ESPECÍFICOS.....	16
3	ÁREA DE ESTUDO.....	17
3.1	LOCALIZAÇÃO.....	17
3.2	ASPECTOS REGIONAIS.....	18
3.2.1	Clima.....	18
3.2.2	Regime hidrológico.....	19
3.2.3	Vegetação.....	20
3.2.4	Geologia e geomorfologia Regional.....	21
4	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	23
4.1	ESTUÁRIOS: DEFINIÇÃO E DESCRIÇÃO DO ESTUÁRIO DOMINADO POR MARÉ.....	23
4.1.1	Estuários dominados por maré.....	23
4.1.2	Morfologia e distribuição de fácies de estuários dominados por maré.....	25
4.2	INTERPOLAÇÃO.....	27
4.3	MÉTODOS DE ESTIMATIVA PARA MODELAGEM DE SUPERFÍCIES.....	28
4.3.1	Triangulação.....	28
4.3.2	Reticulação (Gridding).....	28
4.4	MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO.....	29
4.4.1	Distância inversa ao quadrado.....	29
4.4.2	Krigagem.....	29
4.4.3	Curvatura mínima ou spline.....	30
4.4.4	Método de shepard modificado.....	31
4.4.5	Vizinho natural.....	32
4.4.6	Vizinho mais próximo.....	33
4.4.7	Regressão polinomial.....	33
4.4.8	Função da base radial.....	34

4.4.9	Triangulação com interpolação linear.....	35
4.4.10	Média móvel.....	36
4.4.11	Dados métricos.....	37
4.4.12	Polinômio local.....	37
4.5	VANTAGENS E DESVANTAGENS DE USO.....	38
5	MATERIAIS E MÉTODOS.....	45
5.1	COLETA DOS DADOS.....	45
5.2	PROCESSAMENTO DOS DADOS.....	46
6	RESULTADOS.....	50
6.1	MALHA AMOSTRAL.....	50
6.2	MAPAS COM RESOLUÇÃO “ <i>DEFAULT</i> ”.....	50
6.3	MAPAS GERADOS COM RESOLUÇÃO DE 5 METROS.....	62
7	DISCUSSÃO.....	75
7.1	MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO.....	75
7.2	MORFOLOGIA.....	77
8	CONCLUSÃO.....	79
	REFERÊNCIAS.....	80

1 INTRODUÇÃO

Os estuários são ambientes sedimentares costeiros cuja evolução está relacionada à interação entre parâmetros sedimentares, hidráulicos e os aspectos morfológicos. Caracterizam-se por serem meios receptores de sedimentos, onde os processos evolutivos são rápidos e também constituem-se como sendo importantes zonas de investigação da morfodinâmica atual (FRAZÃO, 2003).

O estudo dos estuários apresenta normalmente um elevado grau de dificuldade, uma vez que estes sistemas aquáticos envolvem geometrias e padrões de circulação hidrodinâmica muito complexas e apresentam-se fortemente modificados por ações antropogênicas (PINHO, 2005). Muitos estudos atuais abordam a modelagem destes ambientes, por meio de modelos digitais de elevação, pois através da aplicação destes modelos para o estudo, é possível obter uma visão dinâmica dos processos que ocorrem nestes complexos sistemas, que são os estuários.

Os modelos digitais de elevação são, na atualidade, ferramentas indispensáveis em muitas aplicações ambientais. Consistem, basicamente, em uma representação computacional da topografia do terreno, usualmente constituída de uma grade regular, tendo cada uma um valor de elevação.

De acordo com Yakar, Yilmaz e Yurt (2010), os dados essenciais de um modelo são um número finito de pontos de referência, que possuem coordenadas (x,y,z) tridimensionais (3D) em um sistema de coordenadas ortogonal ou coordenadas horizontais (x,y) bidimensionais (2D) e altura (z) . Os pontos de referência podem ter uma distribuição regular ou irregular, dependendo da fonte dos dados (mapas de contorno, imagens de satélite, fotografias aéreas, etc.) e dos métodos de coleta de dados (sistema de posicionamento global, fotogrametria, digitalização, etc.). A transferência de dados regulares para padrões de amostragem irregulares ou vice-versa é possível usando um algoritmo de interpolação adequado.

Os métodos de interpolação são necessários para que se possa estimar os valores de pontos não amostrados, em determinada área. Desta maneira, utiliza-se a interpolação para a construção de um novo conjunto dados, a partir de um conjunto de dados pontuais já conhecidos.

Conforme Yakar, Yilmaz e Yurt (op. cit.), falhas em qualquer modelo digital de elevação podem afetar a habilidade para representar o terreno e portanto afeta sua utilidade para uma aplicação em particular. A qualidade de um modelo é afetada por diversos fatores.

Em primeiro lugar, o aumento na resolução espacial das grades de elevação causa diminuição dos níveis de confiabilidade das variáveis mapeadas topograficamente e portanto, diminui a exatidão dos modelos (geração de artefatos). Segundo, o algoritmo de interpolação usado para gerar o modelo digital de elevação pode fornecer resultados que diferem significativamente quando diferentes algoritmos são usados.

A modelação do relevo do terreno, representa um papel importante na compreensão e no desenvolvimento de diversos fenômenos, bem como no apoio à avaliação e gestão dos recursos naturais salientando-se, entre outras, algumas áreas de aplicação como as da modelação ambiental, hidrológica, planejamento territorial, entre outras. Desta maneira, o uso de sistemas de informações geográficas no planejamento e ordenamento do território tem permitido visualizar a necessidade em incorporar a representação digital do terreno, sendo mesmo considerada, na grande maioria dos casos, como dados de base necessários à obtenção de determinados resultados, que conduzam a informação de suporte para tomadas de decisão.

1.1 JUSTIFICATIVA

Diversos estudos têm sido realizados, utilizando modelagem numérica, sobre a propagação da maré em estuários e sobre aspectos físicos relevantes que determinam as principais feições em águas rasas. Gallo (2004) empregou a modelagem numérica para explorar conceitualmente o fenômeno da onda de maré em estuários submetidos à influência da vazão fluvial e sua aplicação ao caso do estuário do rio Amazonas. O autor também cita em seu trabalho diversos outros pesquisadores que estudaram este tema: Prandle e Crookshank (1974), que utilizaram um modelo numérico em diferenças finitas para o estudo das influências do efeito de Coriolis e da vazão fluvial na propagação da maré no trecho inferior do rio Saint-Lawrence, no Canadá. Unnikrishnan et al. (1997) trabalharam com um modelo em diferenças finitas, para o estudo da propagação da maré numa rede de canais na costa oeste da Índia considerando os efeitos da vazão fluvial nas amplitudes da maré. Godin e Martinez (1994) realizaram experimentos numéricos em um canal utilizando a modelagem numérica com o objetivo de analisar os efeitos do atrito na propagação da maré.

Percebendo a crescente demanda pela utilização dos programas computacionais do tipo geo-referenciados, onde a representação gráfica é utilizada também matematicamente, objetivou-se neste trabalho verificar a precisão dos principais métodos de interpolação disponíveis no programa Surfer, versão 9, e compará-los entre si para definir qual se enquadra melhor para representar mais fielmente os dados coletados. Outro ponto importante é a

ausência de trabalhos para a região nordeste paraense que abordem sobre a modelagem dos estuários. Portanto, este trabalho visa contribuir para o melhor entendimento dos vários aspectos morfológicos do estuário, bem como indicar qual seria o melhor interpolador para a área de estudo, além de definir uma resolução espacial para a interpolação de acordo com o agrupamento dos dados batimétricos.

Os resultados finais demonstrarão os modelos batimétricos obtidos para cada algoritmo de interpolação, onde será possível compará-los, afim de verificarmos o método que melhor exprimi as condições morfológicas do estuário em estudo, de acordo com a resolução espacial definida em função do espaçamento de dados batimétricos coletados na área.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

- Obter interpolações de dados batimétricos para verificar a precisão de diferentes métodos de interpolação.

2.2 ESPECÍFICOS

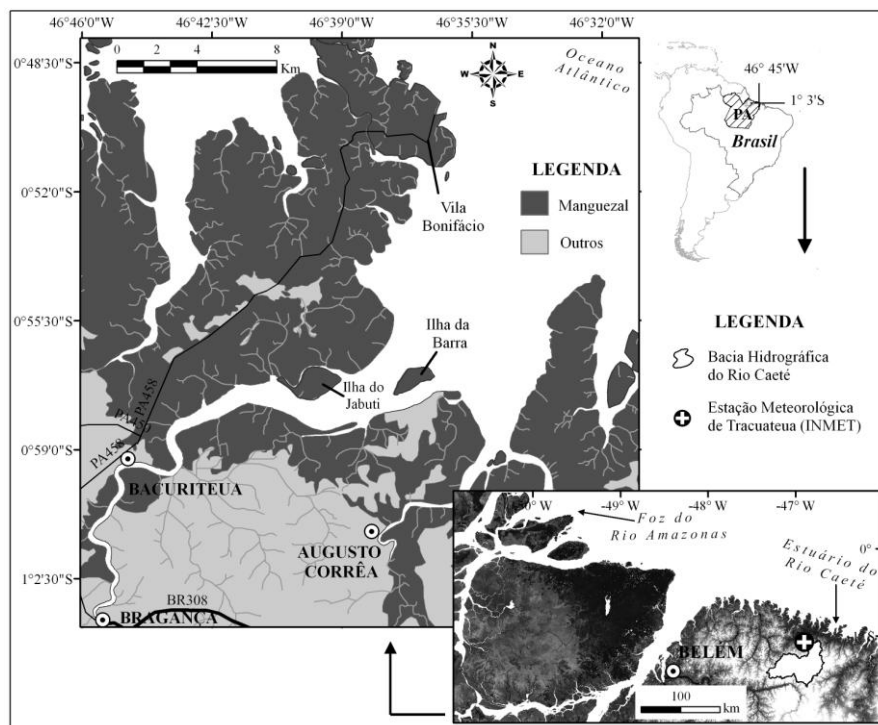
- Comparar os diferentes métodos de interpolação e discutir suas vantagens e desvantagens;
- Definir a resolução espacial que deve ser adotada na interpolação;
- Descrever os principais aspectos morfológicos do estuário.

3 ÁREA DE ESTUDO

3.1 LOCALIZAÇÃO

O estuário do rio Caeté (figura 1) localiza-se na região costeira Bragantina, inserida no litoral NE do estado do Pará ($0^{\circ}51' 15''$ S - $46^{\circ}32'30''$ e $1^{\circ}03'45''$ - $46^{\circ}46'15''$) a leste da foz do rio Amazonas, cerca de 370 km. Possui 100 km de extensão, com uma largura entre as margens de 100 m, nas proximidades da cidade de Bragança, alargando-se gradualmente até 12 km em sua foz (Vila do Bonifácio). No contexto regional é um dos numerosos estuários que recortam “o maior cinturão contínuo de manguezais do planeta” (cerca de 7.591km^2), designado de “Costa de Manguezais de Macromaré da Amazônia” (SOUZA FILHO, 2005), atingindo uma extensão de aproximadamente 30 km na península bragantina.

FIGURA 1 - Mapa de localização da área de estudo.



Fonte: Souza Filho (2005)

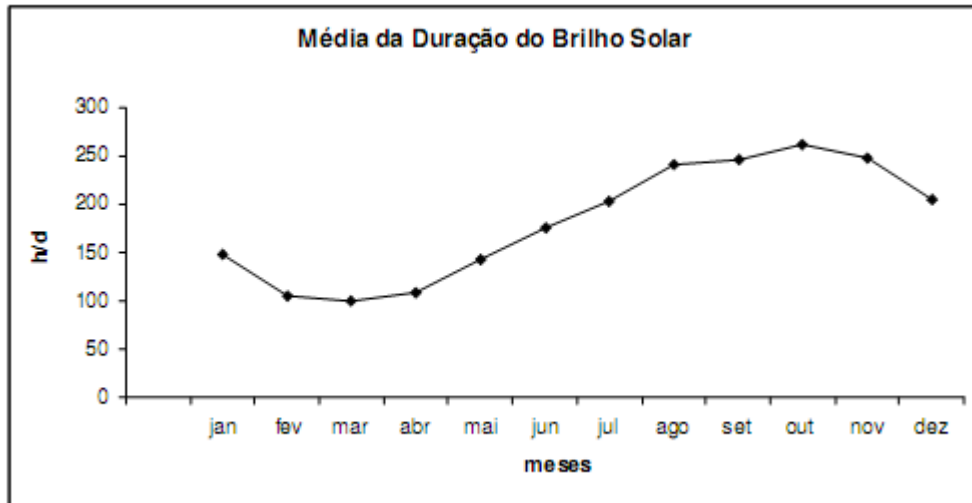
3.2 ASPECTOS REGIONAIS

3.2.1 Clima

O clima, conforme a classificação de Köppen, é do tipo Am, com regime pluviométrico anual de aproximadamente 2.500 mm. Entre os meses de setembro e novembro ocorre uma curta estação seca, com precipitação mensal em torno de 60 mm. A temperatura média é de 26 °C e a umidade relativa do ar varia entre 75% e 89% nos meses com menor (julho e agosto) e maior (janeiro e fevereiro) precipitação, respectivamente (DINIZ, 1991).

Gorayeb (2008) demonstra através de dados da Estação Meteorológica de Tracuateua (Estes dados correspondem a uma série histórica de 12 anos - 1975 a 1987) a insolação da região (figura 2). O total anual do brilho solar chega a 2.189 horas, sendo os meses de julho a dezembro os que apresentam maiores valores. A nebulosidade se faz presente principalmente no período chuvoso (primeiro semestre do ano).

FIGURA 2 - Duração da insolação na Estação Meteorológica de Tracuateua (1975-1987).



Fonte: Gorayeb (2008)

A Zona de Convergência Intertropical é o principal sistema de grande escala que regula o regime de precipitação (2909,8 mm/ano) no litoral do estado do Pará (MÁCOLA; EL-ROBRINI, 2004).

Os ventos deslocam-se a partir da porção oriental do litoral amazônico, periodicamente orientados de Leste (E) e Nordeste (NE), sopram por influência dos

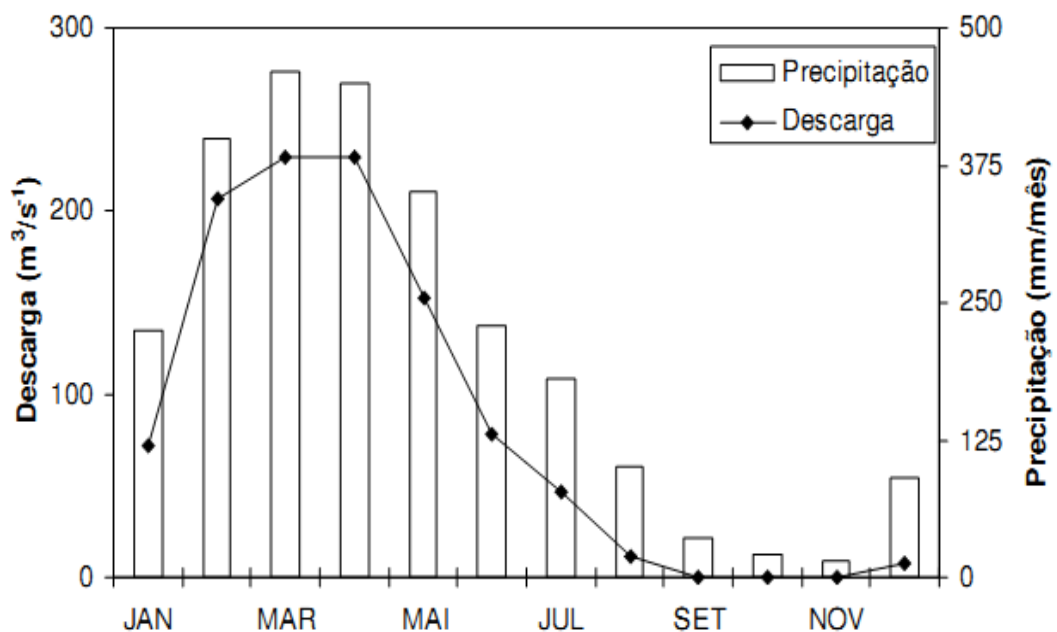
anticiclones dos Açores e do Atlântico Sul (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2006).

3.2.2 Regime hidrológico

O rio Caeté é classificado como rio de água branca. É o principal destaque da hidrografia de Santa Luzia do Pará e de Bragança, apresentando trechos ora estreitos (40 m), ora largos (principalmente próximo a sua foz, onde apresenta 10 km de largura), onde recebe influência das marés. Parte do seu curso é sinuoso, apresentando considerável trecho de várzea (ROCHA, 2009).

Cavalcante (2007) utilizou dados da estação Fluviométrica localizada em Tracuateua, próxima à foz do rio Caeté. O autor considerou uma área de drenagem de 2030 km². Para estimar a taxa mensal total média de descarga de água doce na Baía do Caeté, o autor usou primeiramente a área total de drenagem e a taxa de precipitação. A temperatura e a precipitação foram baseadas em uma série de dados de vários anos, indicando uma boa representatividade para área do estuário. Assumindo a área integral, a taxa de descarga mensal de água doce foi calculada (figura 3). A estimativa dada por Cavalcante (op.cit.) de descarga de água doce mensal é em média alta/baixa durante o período chuvoso/seco (161 m³ s⁻¹ / 2,8 m³ s⁻¹)

FIGURA 3 - Descarga de água doce (m³ s⁻¹) e precipitação na estação de Tracuateua dentro da Baía de Caeté.



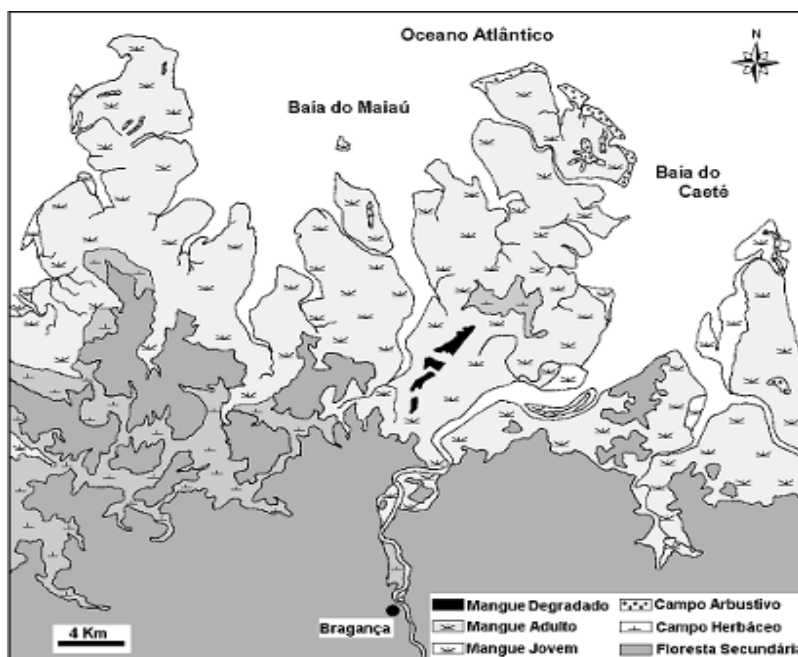
Fonte: Cavalcante (2007)

3.2.3 Vegetação

Na Amazônia brasileira as florestas secundárias ocupam 30% da área onde a vegetação primária foi substituída. No nordeste do Pará, elas respondem por 90% de toda a cobertura vegetal (FERREIRA; OLIVEIRA, 2001). A região apresenta grandes mosaicos de tipos florestais, desde áreas degradadas com solos desgastados, comuns no município de Bragança (colonização em torno de 200 anos) até municípios como Capitão Poço e Garrafão do Norte (colonização recente) onde a degradação do solo é menor e os fragmentos de floresta primária fazem parte da paisagem (BAAR et al. 2004).

A vegetação de mangue ocupa toda a Planície Costeira Bragantina, penetrando em direção ao continente ao longo dos canais estuarinos (figura 4). Essa vegetação ocupa as áreas sob influência de águas salinas e salobras, sendo constituída somente por comunidades típicas. A vegetação de campo ocorre em áreas periodicamente alagadas, sob influência pluvial e de águas salobras. É representada pelos pântanos salinos, colonizados predominantemente por *Alecharias* sp.(juncos). Os campos arbustivos ocorrem sobre cheniers e campos de dunas. São representados por *Chrysobalanus icaco* L. (ajuru); *Anacardium occidentale* L. (caju) e *Byrsonma crassifolia* H.B.K. (muruci), com gramineae e cyperaceae associada (SOUZA FILHO ; EL- ROBRINI, 2000).

FIGURA 4 - Mapa de vegetação da Planície Costeira Bragantina



Fonte: Souza Filho e El- Robrini (2000)

3.2.4 Geologia e geomorfologia regional

Baseado em Souza Filho e El – Robrini (2005), a planície estuarina do Rio Caeté é um dos ambientes morfo-sedimentares da Planície Costeira Bragantina, que segundo Franzinelli (1982, 1992) é caracterizada como uma costa transgressiva baixa, onde o Planalto Costeiro recua em direção ao sul, constituindo falésias mortas e as baías recortam a planície costeira. Este setor vem sofrendo um processo de subsidência, provavelmente relacionado a eventos neotectônicos de reativação de falhamentos normais (COSTA *et al.* 1993; IGREJA, 1991). A costa de submersão é referida neste trabalho como uma costa embaiada, transgressiva e dominada por macromaré com seis metros de amplitude, dominante nesta área.

Ainda segundo Souza Filho e El- Robrini (op. cit.), a planície estuarina é limitada a sul pela planície aluvial no limite superior da influência das marés, e a norte pela zona onde dominam os processos marinhos. É margeada pela planície costeira em sua porção distal e pelo Planalto Costeiro na proximal, ocupando uma área de 462 km². Três unidades morfológicas são observadas:

- **Canal Estuarino do Rio Caeté:** varia da porção distal para a proximal, refletindo progressivamente a influência das marés ao longo do canal estuarino. É compartimentado em quatro padrões morfológicos distintos, semelhante à subdivisão proposta por Woodroffe *et al.* (1986, 1989) para o Rio Aligátor, na Austrália:

- **Funil Estuarino:** representa a foz do estuário (7.5 km de largura) e mostra um alargamento brusco em direção ao mar. É bordejado por depósitos de manguezais e pela planície arenosa (constituem sua planície de inundação) e, localmente, pelo Planalto Costeiro. Barras arenosas de marés e ilhas de manguezais são freqüentes e estão amplamente distribuídas nesse trecho do estuário;

- **Segmento Retilíneo:** é dominado por fortes correntes de marés e os sedimentos são transportados em direção a montante. É bordejado por terraços de abrasão esculpidos nos depósitos de manguezais, submersos durante as marés altas. Barras arenosas de maré também ocorrem ao longo desse trecho;

- **Segmento Meandrante:** limitado por falésias esculpidas em sedimentos do Planalto Costeiro, sobre o qual desenvolve-se a planície de inundação, colonizada por manguê e gramíneas. Na parte côncava dos meandros, as margens são erosivas, enquanto que na parte convexa ocorrem os depósitos de barra em pontal.

- **Canal de Curso Superior**: encontra-se encaixado no Planalto Costeiro, mostrando alternância de segmentos retos e sinuosos, espaçados irregularmente. Franjas de manguezal bordejam o canal, onde barras em pontal e longitudinais são freqüentes.

- **Canais de Maré**: recortam a planície costeira e apresentam forma meandrante a retilínea, com largura máxima de 100 m. Em direção ao continente, são bifurcados, rasos, estreitos e com substrato lamoso; em direção ao mar, os mesmos são singulares e largos, com fundo arenoso. São freqüentes barras em pontal.

- **Planície de Inundação**: ocorre ao longo do funil estuarino e dos segmentos retilíneos e meandantes, onde são observados depósitos lamosos. No canal de curso superior, as planícies de inundação são constituídas por sedimentos pelíticos fitoturbados, ricos em matéria orgânica. Às margens desse trecho, ocorrem estreitas franjas de manguezal, seguidas por gramíneas e palmeiras que colonizam a planície de inundação e desaparecem quando entram em contato com o Planalto Costeiro.

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 ESTUÁRIOS: DEFINIÇÃO E DESCRIÇÃO DO ESTUÁRIO DOMINADO POR MARÉ

A definição mais utilizada para os estuários foi dada por Pritchard (1967), baseada na salinidade, que os define como corpos de água costeiros semifechados que têm uma ligação livre com o mar e nos quais a água do mar se dilui, de forma mensurável, com água doce proveniente da drenagem terrestre. Porém Dalrymple, Zaitlin e Boyd (1992) afirmam que este conceito é de uso limitado quando se trata do estudo de depósitos antigos. Desta maneira, os autores definem o estuário como o baixo curso de um sistema de vale afogado que recebe sedimento de fontes tanto fluvial como marinha, e que contém fácies influenciadas por processos fluviais, por onda e por maré. O estuário estende-se do limite superior das fácies de maré, na direção de sua cabeceira, para o limite inferior das fácies costeiras, na direção da sua desembocadura. Dyer¹ (1997 apud MIRANDA; CASTRO; KJERFVE, 2002) define os estuários de forma mais completa, adaptado da clássica definição de Pritchard:

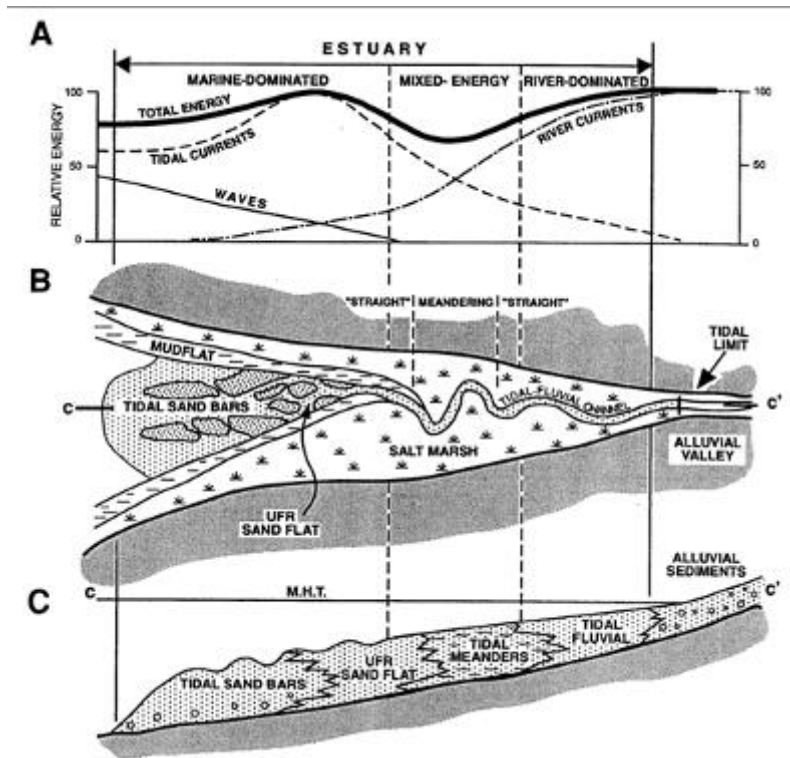
“Estuário é um corpo de água costeiro semifechado com ligação livre com o oceano aberto, estendendo-se rio acima até o limite da influência da maré, sendo que em seu interior a água do mar é mensuravelmente diluída pela água doce oriunda da drenagem continental.”

4.1.1 Estuários dominados por maré

Segundo Miranda, Castro e Kjerfve (op. cit.) o estuário do tipo dominado por maré (figura 5), caracteriza-se pelas velocidades geradas pela maré serem bem mais intensas do que aquelas da descarga fluvial. A diferença mais marcante entre esses estuários é o grau de estratificação vertical, sendo um de seus extremos o estuário verticalmente homogêneo como o do rio Raritan (Nova Jersey, EUA), cuja profundidade média é de apenas 3 m.

¹ Dyer, K. R. *Estuaries, A Physical Introduction*, 2nd Edition. John Wiley & Sons, Chichester, 195 pp.1997.

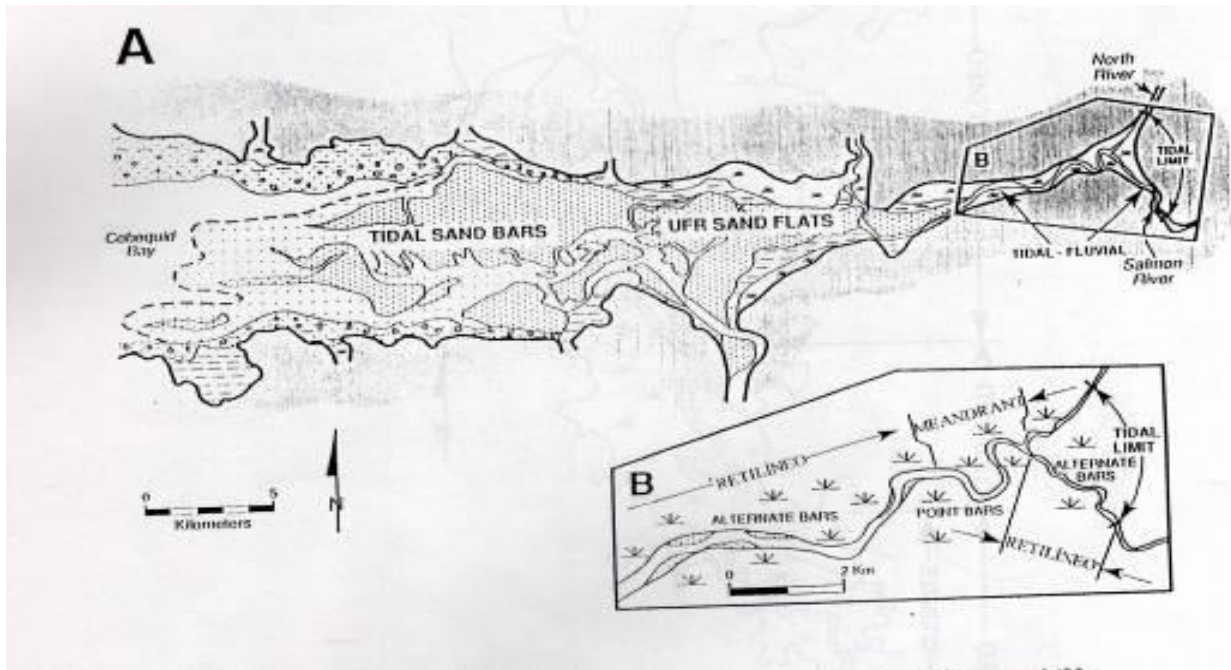
FIGURA 5 – Distribuição de A) tipos de energia, B) elementos morfológicos em visão plana e C) fácies sedimentares em seção longitudinal em um estuário dominado por maré idealizado.



Fonte: Dalrymple et al (1992)

A energia da corrente de maré excede a energia das ondas nas desembocaduras dos estuários dominados por maré, e as barras arenosas alongadas, são geralmente, desenvolvidas (figura 6). As barras dissipam a energia das ondas, que decresce à medida que se distancia estuário acima. Por outro lado, a entrada de maré enchente é progressivamente comprimida dentro de uma área de seção transversal menor, devida à geometria de forma de funil que caracteriza esses estuários, e as velocidades das correntes de maré enchente crescem dentro do estuário (figura 4-A). A energia fluvial decresce na direção da jusante como nos sistemas dominados por onda. Medições feitas em muitos estuários, por exemplo, dos Rios Salmon – Baía Cobequid (Canadá) e do rio Severn (Grã-Bretanha), sugerem que o ponto onde a energia fluvial e a energia de maré são iguais encontra-se a montante do ponto de máxima energia da maré. Como nos sistemas dominados por onda, este ponto de balanço é o ponto de mínima, na curva de energia total.

FIGURA 6 – A) Zonação de fácies no estuário Baía Cobequid - Rio Salmon (Canadá), dominado por maré. A linha tracejada, na Baía Cobequid, marca o limite externo do corpo arenoso estuarino. B) Porção interna do estuário, em escala maior, mostrando as mudanças longitudinais na morfologia do canal e nos tipos de barras.



Fonte: Dalrymple et al (1990)

4.1.2 Morfologia e distribuição de fácies de estuários dominados por maré

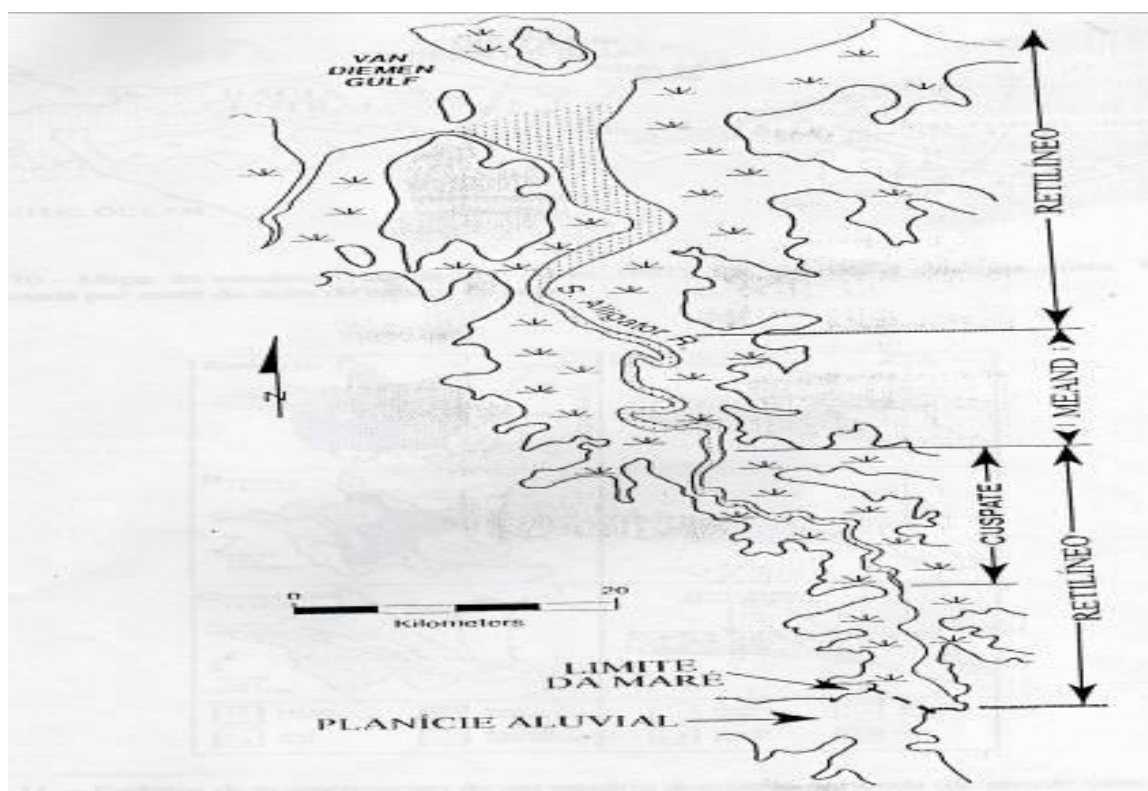
Esse total de energia mínima não é tão significativo quanto nos estuários dominados por ondas, devido ao fato de a energia de maré penetrar mais para montante do que a energia das ondas (DALRYMPLE, ZAITLIN E BOYD, 1992). Desse modo, a distribuição de fácies tripartite (grossa – fina – grossa) não é tão evidente, e as areias ocorrem nos canais de maré que correm ao longo da extensão do estuário (WOODROFFE et al, 1989; DALRYMPLE et al.1990). Todavia, o mínimo de energia está nos locais de areias de canal mais finas. Os sedimentos lamosos se acumulam, principalmente, nas planícies de maré e nos pântanos, ao longo das laterais dos estuários.

Nos casos extremos, o corpo arenoso marinho consiste de duas fácies fortemente contrastantes. A mais conhecida é a zona de barra arenosa de maré alongada, que é caracterizada por areia grossa a média de estratificação cruzada. Essas barras encontram-se a jusante do máximo de energia de maré. A segunda fácies, que coincide com o máximo de energia de maré, consiste de planícies arenosas de regime de fluxo superior, que apresentam

um padrão de canais entrelaçados, onde o estuário é largo mas se transforma de confinado a canal único mais a montante (figura 6). Os depósitos dessas fácies, que podem não estar presentes nos estuários dominados por maré com amplitudes de maré menores, consistem de areias de fina granulometria paralelo – laminadas.

Na parte central, zona de baixa energia dos sistemas nos quais o canal principal não é confinado, o canal apresenta uma progressão regular de sinuosidades (DALRYMPLE; ZAITLIN 1989; WOODROFFE et al., 1989) que pode-se chamar de “retilíneo – meandrante – retilíneo”(figura 7). Nesses estuários, o trecho retilíneo externo é dominado por maré, e a rede de transporte de sedimentos é para montante devido às fortes correntes de maré enchente. No trecho retilíneo interno a rede de transporte de sedimentos é corrente abaixo devido ao domínio, em larga escala, do fluxo fluvial sobre as correntes de maré. A região entre os dois trechos retilíneos apresenta meandros fechados (figuras 6 e 7) , que comumente mostram barras em pontal simétricas. Esta zona de meandros é a porção de energia mais baixa do sistema e é o ponto de localização da rede de convergência de carga do leito. O tamanho dos grãos, no canal, se torna mais fino na direção desta área, proveniente de ambas as direções.

FIGURA 7 – Mapa da parte interna do estuário South Alligator River, mostrando o padrão de canal retilíneo-meandrante-retilíneo.

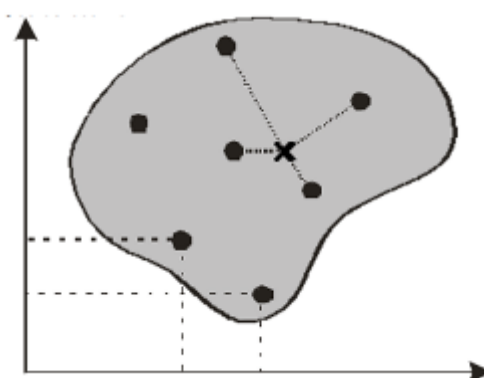


Fonte: Dalrymple et al (1992)

4.2 INTERPOLAÇÃO

Segundo Burrough (1986), o procedimento de estimar o valor da variável em pontos não visitados, através de valores conhecidos é denominado de interpolação. Interpolar, portanto, significa predizer ou estimar, o valor da variável em estudo num ponto não amostrado. Na figura 8, o x representa o ponto que se pretende predizer o valor.

FIGURA 8 - Pontos de amostragem (1 a 7) e de estimativa (x) numa área de estudo.



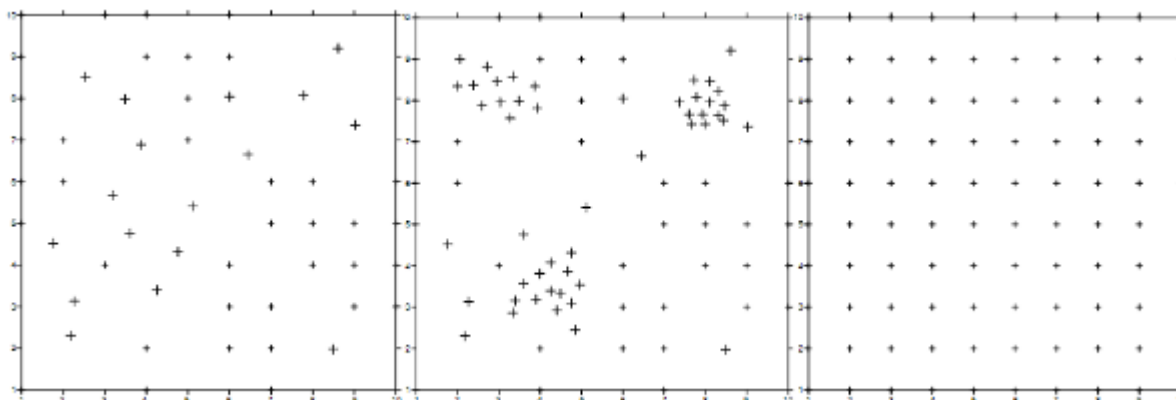
Fonte: Landim (2000).

Certos critérios, de acordo com Landim (2000), definem o interpolador ideal:

- superfície interpolada ajusta-se aos dados a um determinado nível de precisão; é fiel aos dados dentro de um limite arbitrário definido pelo usuário;
- superfície interpolada é contínua e suave em todos os locais; tem um gradiente finito em todo local onde a interpolação for necessária;
- cada valor interpolado depende apenas do subgrupo local de dados, e os membros deste subgrupo são determinados somente pela configuração dos dados que, de algum modo, são próximos ao ponto interpolado;
- método de interpolação pode ser aplicado à todas as configurações e padrões de densidade dos dados.

O primeiro passo em qualquer estudo espacial é a definição do delineamento experimental, que envolve, entre outros procedimentos, a escolha da técnica de coleta de amostras e também da malha de amostragem (figura 9). A malha de amostragem pode ser do tipo: aleatória, quando a distribuição dos pontos de coleta é casual; agregada ou agrupada, quando ocorrem grupos (cluster) de pontos mais próximos entre si; e regular, quando os pontos estão regularmente espaçados (LANDIM; MONTEIRO E CORSI, 2002).

FIGURA 9– Malhas de amostragem, da esquerda para direita: Aleatória, agrupada e regular.



Fonte: Landim, Monteiro e Corsi (2002).

4.3 MÉTODOS DE ESTIMATIVA PARA MODELAGEM DE SUPERFÍCIES

4.3.1 Triangulação

A triangulação conecta pontos amostrados através de triângulos e interpola os valores entre eles. São considerados métodos de estimativa diretos, pois os contornos derivam do padrão original dos dados. Não permite extrapolação e as estimativas limitam-se estritamente à área amostrada. A geração da triangulação é mais complicada do ponto de vista computacional. Uma triangulação otimizada necessita de algoritmos complexos para ser realizada, a estrutura dos dados deve ser mais elaborada para satisfazer a otimização de um algoritmo de triangulação, os dados que representam a triangulação devem ser muito bem estruturados (BARBOSA, 1999).

4.3.2 Reticulação (Gridding)

Estabelece uma grade regular (grid) sobre a área estudada e calcula os valores nos nós do reticulado com base nos valores dos pontos adjacentes já amostrados. São considerados métodos de estimativa indiretos, uma vez que os contornos são construídos a partir dos dados estimados para os nós da grade e não a partir dos dados originais. Além disto, permite tanto a interpolação quanto a extrapolação de valores. Um algoritmo matemático é utilizado para ajustar uma superfície através dos dados estimados para os nós, há um grande número de algoritmos.

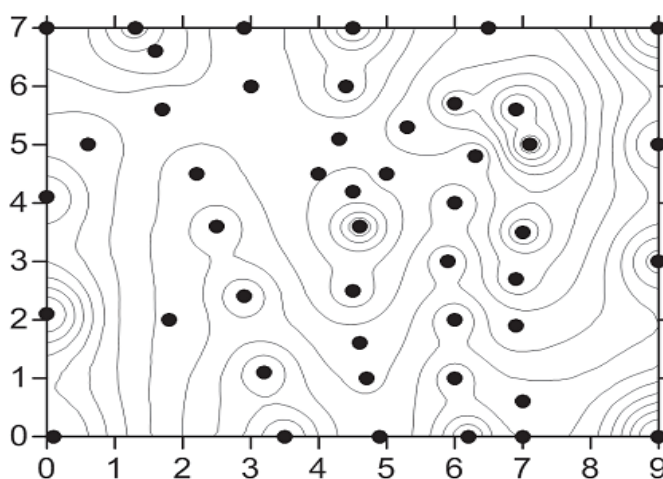
4.4 MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO

O Surfer, na sua nona versão, dispõe de 12 métodos de interpolação, a seguir descritos:

4.4.1 Distância inversa ao quadrado

Este método (figura 10) pode ser classificado tanto como um interpolador exato como suavizante, faz com que os pesos dos dados sejam avaliados durante o processo de interpolação, tal que a influência de cada ponto é inversamente proporcional à distância do nó da malha. O fator peso pode ser pré-determinado pelo usuário, sendo que quanto maior o valor escolhido, menor será a influência dos pontos mais distantes do nó. Inversamente, quanto menor for o peso, maior o efeito de pontos distantes sobre toda a malha. Uma característica negativa deste método é a geração do “efeito mira”, ou ‘bull’s eye’, em inglês, ao redor dos pontos observados. Este é um método rápido e requer pouco custo computacional.

FIGURA 10 – Interpolação usando distância inversa ao quadrado.



Fonte: Surfer 9 guide.

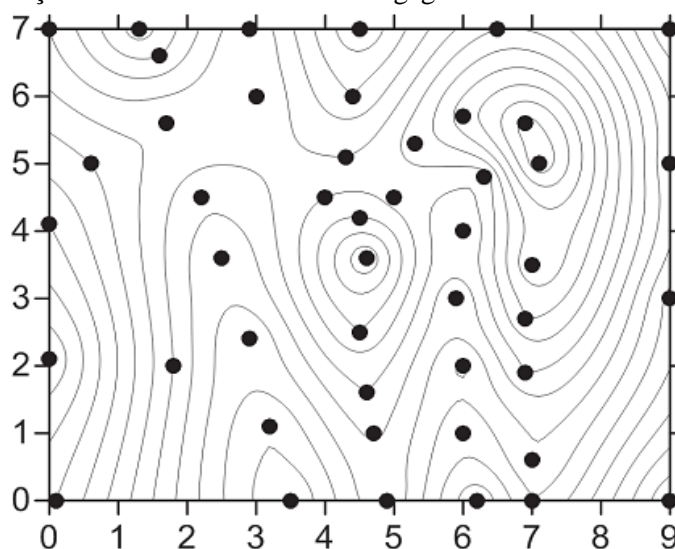
4.4.2 Krigagem

A krigagem é um método geoestatístico que tem se mostrado útil e popular em muitos campos. A krigagem define o grau de dependência ou correlação espacial entre as

amostras através do semivariograma (CRESSIE, 1991). O termo ‘geoestatística’ foi dado por Matheron em seu trabalho para a solução de problemas espaciais voltados para a mineração (OLIVEIRA, 1991). Matheron foi influenciado pelos trabalhos realizado pelo engenheiro de minas Daniel G. Krige, na África do Sul, de onde surgiu o nome do método. Uma vez modelado o semivariograma, é possível verificar o nível de anisotropia dos dados, e então definir os melhores pesos para as amostras. Este método produz mapas interessantes, a partir de dados espaçados irregularmente. A Krigagem tenta expressar tendências sugeridas em seus dados, de modo que, por exemplo, pontos de elevada altitude ao longo de uma cadeia montanhosa possam ser conectados ao invés de gerar o “efeito mira” (bull’s eye).

Este é um método de gradeamento muito flexível. No Surfer, o padrão da Krigagem pode ser aceito para produzir um gradeamento preciso dos dados, ou pode ser ajustado para um conjunto de dados, especificando-se um modelo de variograma adequado. A Krigagem, no Surfer (figura 11), pode ser um interpolador tanto exato como suavizador, dependendo dos parâmetros especificados pelo usuário (YANG et. al, 2004).

FIGURA 11 - Interpolação com uso do método de Krigagem.



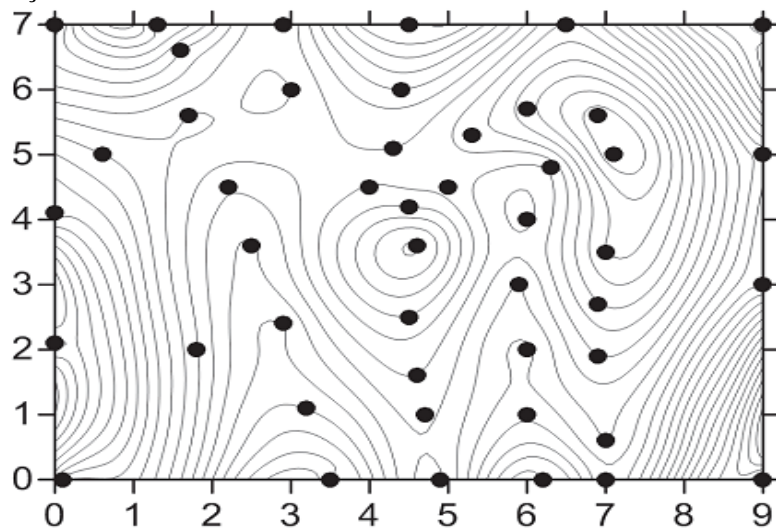
Fonte: Surfer 9 guide.

4.4.3 Curvatura mínima ou spline

Este é um método de interpolação muito aceito e bastante utilizado, principalmente no ramo das geociências. Este método gera curvas mais suaves (figura 12) ao mesmo tempo tentando honrar ao máximo os dados, entretanto não é um interpolador exato (MAZZINI; SCHETTINI, 2009). É baseada em teorias de matemática aplicada (derivação), não utiliza

apenas um polinômio de grande ordem para interpolação de todo o conjunto de dados, mas sim divide a série de dados em subconjuntos e utiliza polinômios de pequenas ordens para cada subconjunto. A soma ou junção deles é que forma a interpolação sobre todo o domínio. O grau de polinômio mais utilizado é o terceiro, spline cúbico (EMERY ; THOMPSON, 1997). Outras vantagens deste método, são a boa convergência, aproximações precisas das derivações, e boa estabilidade na presença de erros de aproximação (EMERY ; THOMPSON, 1997).

FIGURA 12 – Interpolação utilizando Curvatura mínima.

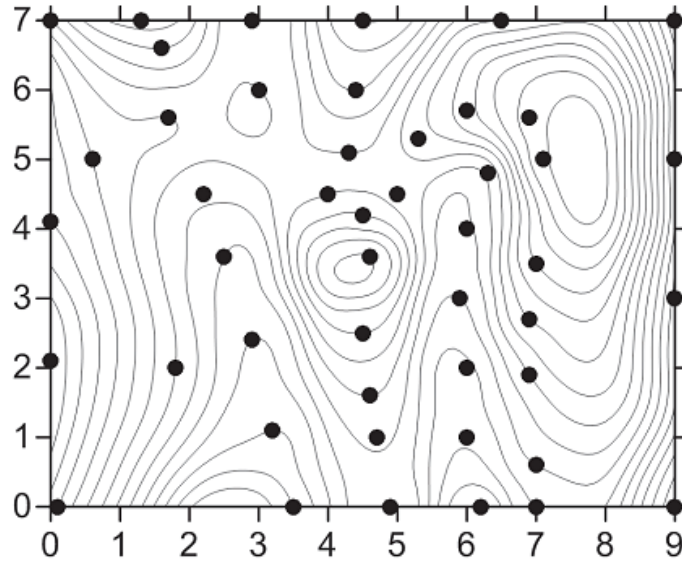


Fonte: Surfer 9 guide.

4.4.4 Método de shepard modificado

O método de Shepard (figura 13) é uma variação do método da distância inversa ao quadrado e considera além da distância, o ângulo entre os pontos conhecidos (WEIRICH, 2006). Distingue-se deste, por utilizar localmente o método dos mínimos quadrados para reduzir ou eliminar o efeito mira. Pode ser tanto um interpolador exato como suavizante.

FIGURA 13 – Interpolação através do método de Shepard modificado.

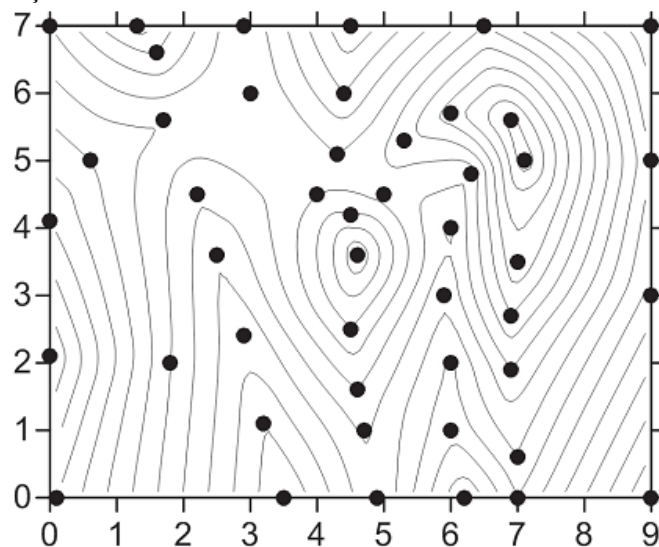


Fonte: Surfer 9 guide.

4.4.5 Vizinho natural

Segundo Mazzini e Schettini (2009), este método (figura 14) não tende a extrapolar valores, resolvendo a interpolação somente para o interior do domínio dos dados. Esta técnica utiliza polígonos Thiessen para avaliação de pesos para os pontos. Por exemplo, se um novo ponto (alvo) forem adicionados ao conjunto de dados, estes polígonos podem ser modificados. Este método faz a interpolação através da média ponderada dos pontos vizinhos, onde os pesos são proporcionais aos pontos existentes.

FIGURA 14 – Interpolação utilizando o método “vizinho natural”.

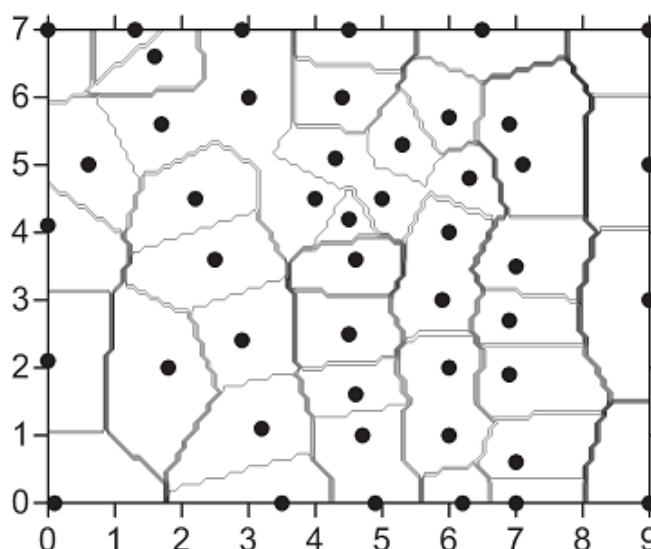


Fonte: Surfer 9 guide.

4.4.6 Vizinho mais próximo

Este método (figura 15) atribui o valor do ponto mais próximo para cada nó. Isto é útil quando os dados já estão espaçados regularmente. Mostra-se útil também para o preenchimento de lacunas nos dados em casos onde os dados estão próximos em uma malha, com muitos valores em falta.

FIGURA 15 – Interpolação utilizando “Vizinho mais próximo”.

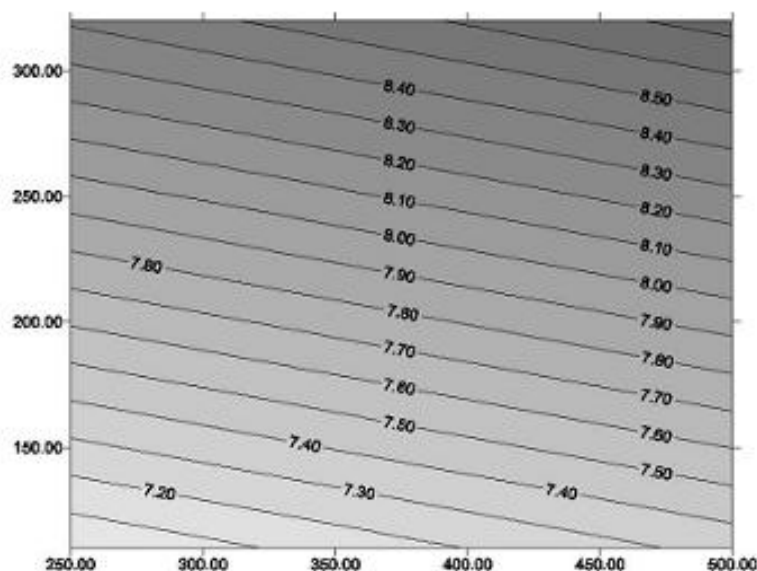


Fonte: Surfer 9 guide.

4.4.7 Regressão polinomial

É utilizado para definir padrões e tendências de larga-escala dos dados. Segundo Landim (1998), este método recebe o nome de análise de superfície de tendência, e ajusta um plano aos dados através de uma regressão pelo método dos mínimos quadrados. Landim (2001) argumenta que o ajuste é incrementado pela adição de termos adicionais (ordens) à equação polinomial e se necessário, é possível calcular os resíduos entre a superfície gerada e os valores originais. Podem ser obtidos contornos muito suaves em superfícies de alto grau e as isolinhas podem não ser fiéis aos dados originais. Este método (figura 16) é adequado para "remoção" de tendências e destaque de resíduos. Alguns artefatos indesejados podem ser gerados nas bordas e no interior do mapa quando houver áreas sem dados amostrados e com a utilização de ordens polinomiais elevadas.

FIGURA 16 - Superfície de 1º grau, calculada pelo algoritmo “regressão polinomial”.



Fonte: Landim (2001).

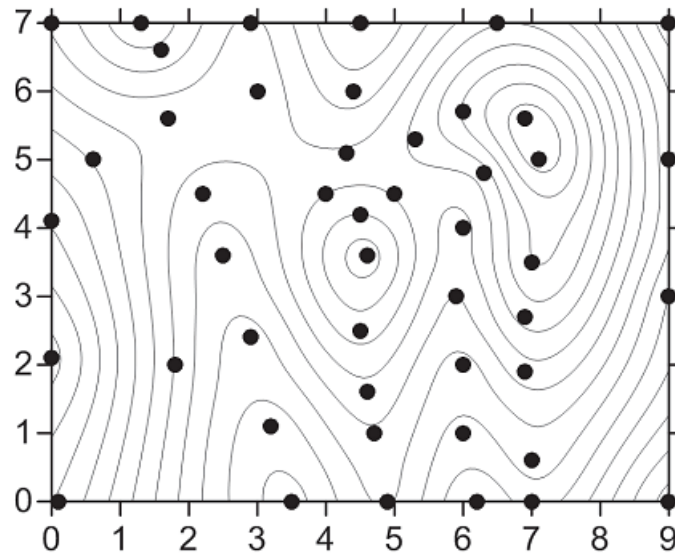
Segundo Mazzini & Schettini (2009), a regressão polinomial não é exatamente um método de interpolação, pois não tenta prever valores da variável dependente (valor da variável Z).

4.4.8 Função da base radial

A função da base radial (figura 17) é um conjunto de métodos de interpolação exatos. A maioria dos métodos são derivações de spline, com características similares uns dos outros. Todos os métodos das Funções de Base Radial são interpoladores exatos, então eles tentam honrar os dados inseridos. O método de derivação multi-quadrático é o padrão automático no Surfer, pois é considerado o melhor na maioria dos casos (MAZZINI ; SCHETTINI, 2009).

As funções de base radial são usadas para se calcular superfícies suavizadas de um grande número de pontos. As funções produzem bons resultados para superfícies de pouca variação, como de elevação de terreno (EICHMAN; FERRAZ, 2006).

FIGURA 17 – Exemplo de Interpolação utilizando o método de função da base radial.



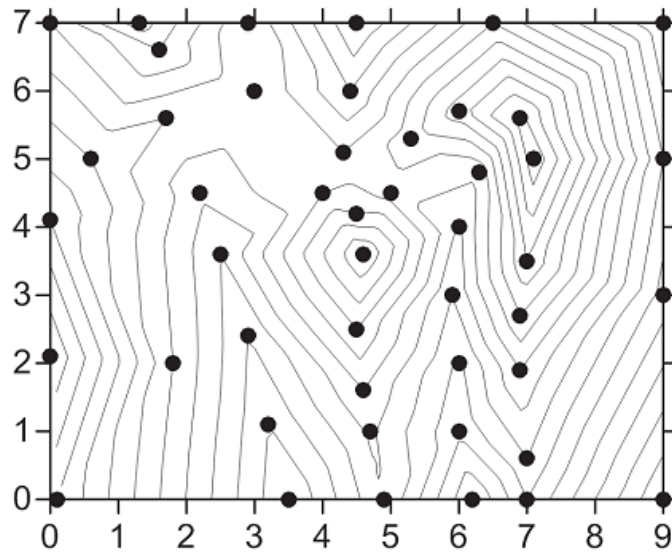
Fonte: Surfer 9 guide.

4.4.9 Triangulação com interpolação linear

Este método é considerado um interpolador exato e no Surfer, utiliza malha irregular com triangulação Delaunay. Este algoritmo cria triângulos desenhando linhas entre os pontos dados. Os pontos originais são conectados de tal maneira que não há arestas de nenhum triângulo entrecortando outro.

O resultado é uma colcha de retalhos de faces triangulares (figura 18) sobre a extensão da grade. Como os dados originais são usados para definir os triângulos, os dados são reproduzidos com bastante fidelidade. Funciona melhor quando os dados estão distribuídos de forma regular ao longo do domínio. Dados que contenham áreas dispersas ou espaçadas tendem a apresentar feições triangulares no gráfico (MAZZINI ;SCHETTINI, 2009).

FIGURA 18 – Triangulação com interpolação linear.

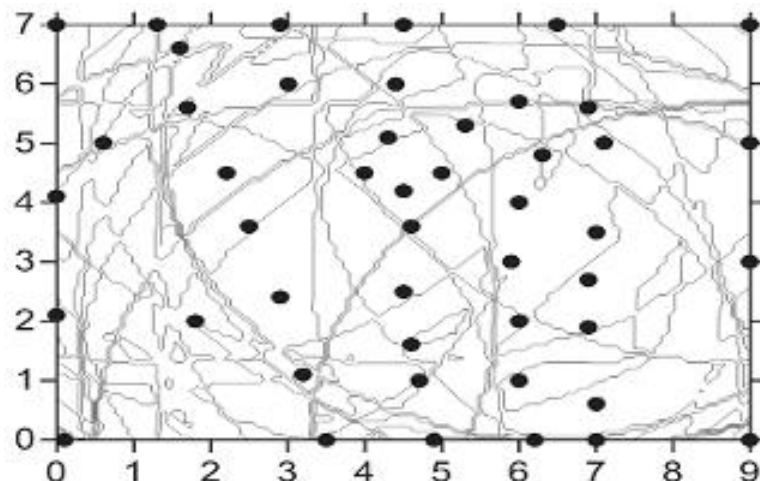


Fonte: Surfer 9 guide.

4.4.10 Média móvel

De acordo com Yang et.al.(2004) este método (figura 19) atribui valores aos nós da malha através da média dos dados que estão no domínio da elipse de busca do nó. A elipse, cujo tamanho pode ser determinada pelo usuário assim como também o número mínimo de dados a serem utilizados, situa-se no centro do nó, que tem seu valor obtido pela média aritmética dos dados observados dentro da elipse. Caso o número de dados observados no domínio da elipse seja menor que o estipulado, nenhum valor é atribuído ao nó.

FIGURA 19 – Interpolação utilizando Média móvel.

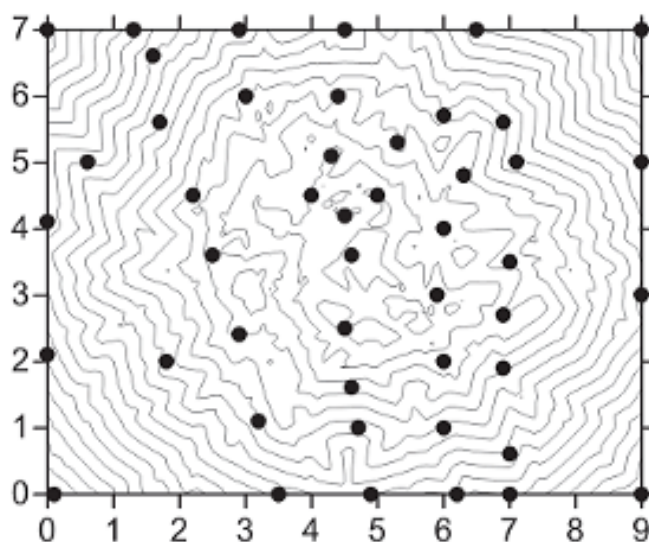


Fonte: Surfer 9 guide.

4.4.11 Dados métricos

Mazzini e Schettini (2009) afirmam que a coleção de métodos de dados métricos criam grades de informações sobre os dados de base de nó a nó. Estes métodos não são, em geral, interpoladores de médias ponderada dos valores-Z. Através desta ferramenta, pode-se obter, por exemplo: o número de pontos de dados utilizada para interpolar cada nó da grade; o desvio padrão, variância, coeficiente de variação e desvio absoluto médio dos dados em cada nó da grade, que são medidas da variabilidade no espaço da grade, que é uma informação importante para a análise estatística e a distância para os dados do ponto mais próximo. Por exemplo, se os valores XY de um conjunto de dados são locais de amostragem, a distância para o dado métrico mais próximo pode ser usada para determinar uma nova amostragem de localidades. (figura 20)

FIGURA 20 - Mapa gerado através do interpolador Dados métricos.

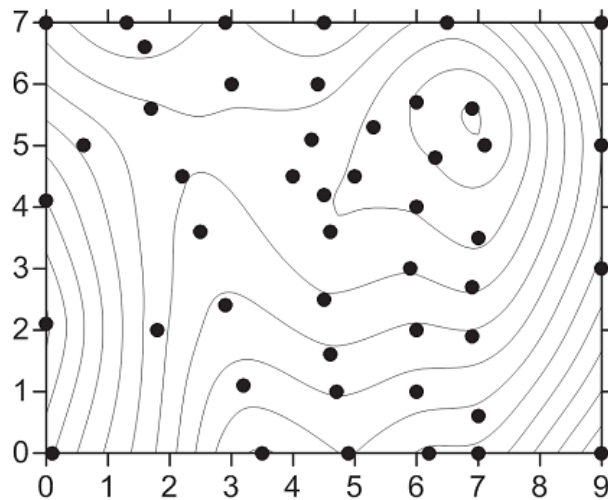


Fonte: Surfer 9 guide.

4.4.12 Polinômio local

Este método (figura 21) atribui valores aos nós da malha utilizando o método dos mínimos quadrados a partir dos dados de dentro da elipse de busca do nó, sendo que os dados observados mais próximos do nó obtêm maior peso nos cálculos, e os mais distantes, menores pesos (YANG et.al., 2004).

FIGURA 21 – Interpolação usando Polinômio local.



Fonte: Surfer 9 guide.

4.5 VANTAGENS E DESVANTAGENS DE USO:

Cada método de interpolação possui suas vantagens e desvantagens de uso, e alguns são mais apropriados para determinado uso em comparação a outro. Landim (2000) descreve algumas destas características, que podem ser visualizadas nas tabelas abaixo, referentes aos principais métodos de interpolação utilizados:

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens da utilização da Regressão Polinomial

REGRESSÃO POLINOMIAL	
Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Uma única superfície é gerada. • Fácil definição de parâmetros. a mesma superfície é gerada mesmo com mudança na orientação da grade. • Tempo para cálculo de superfícies de baixa ordem é baixo. • Contempla tanto as tendências regionais quanto anomalias locais. 	<ul style="list-style-type: none"> • Extrapola valores de Z para além dos limites da área amostrada. • Anomalias locais não são vistas em mapas de superfícies de baixa ordem, porém podem ser destacadas em mapas para os resíduos. • A quantidade de RAM necessária aumenta exponencialmente com o aumento da ordem do polinômio.

Quando usar	Quando não usar
<ul style="list-style-type: none"> • Número adequado de pontos amostrados estiver disponível, sempre maior que o número de coeficientes da equação: ordem=1, coeficientes = 2, pontos ≥ 3 Ordem=2, coeficientes = 5, pontos ≥ 5 • Dados forem regularmente distribuídos. • "Gerar" novos dados em áreas com dados esparsos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Poucos dados, com distribuição irregular ou para uma superfície real com alta variabilidade local. • Superfície for descontínua por falhas ou inconformidades. • Amplitude da superfície variar drasticamente ou erráticamente: anomalias locais de grande variação.

Fonte: Landim (2001)

Tabela 2 – Características do Inverso da distância

INVERSO DA DISTÂNCIA	
Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Fácil de entender matematicamente. • Algoritmo bem conhecido e discutido • Disponível em muitos softwares. • Utiliza pouco tempo de computação. • É razoavelmente fiel aos valores amostrados originais. • Bom para estimativas de espessura, concentração química e propriedades físicas • Muito bom para analisar variações de pequena amplitude (anomalias) entre os dados irregularmente 	<ul style="list-style-type: none"> • Ruim para estimativas de dados estruturais, isto é, para determinar o topo ou a base de horizontes estratigráficos ou litológicos. • Muito difícil obter a localização precisa de uma determinada isolinha se os valores amostrados não contiverem este valor; é difícil projetar a curva de altitude zero se os dados não contiverem zero ou valores negativos. • Influência de valores locais anômalos é difícilmente removida; dados em clusters podem influenciar as estimativas de modo bastante tendencioso. • Cria muitos artefatos (pontos extremos falsos), o que pode ser reduzido ou eliminado se o raio de busca for reduzido, se a tendência for removida previamente e se ocorrer mudanças no expoente utilizado, no tamanho

distribuídos. • Bom estimador para propósitos gerais.	da grade, no número de pontos utilizados e ponderação direcional.
Quando usar	Quando não usar
<ul style="list-style-type: none"> • Estimativas de propósito geral. • Distribuição uniforme de dados. • Boa densidade de dados. • Para destacar anomalias locais. • Para calcular volume em operações entre grids. 	<ul style="list-style-type: none"> • Dados agrupados • Tendência pronunciada presente. • Dados com falhas e distribuídos de forma esparsa. • Não quiser artefatos.

Fonte: Landim (2000)

Tabela 3 – Características da Curvatura Mínima

CURVATURA MÍNIMA	
Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Superfície estimada é independente da distribuição dos dados e da presença de ruído (noise). • Superfície estimada é a mais suave entre as geradas pelos outros algoritmos que ajustam superfícies aos dados amostrados. • Superfície é absolutamente fiel aos dados originais se houver apenas um valor amostrado por célula. • Menor número de artefatos, com exceção das bordas e interior de células sem amostragem. • Capaz de estimar além dos valores máximo e mínimo dos dados amostrados. 	<ul style="list-style-type: none"> • Superfície suave é gerada, quer realmente exista ou não. • Havendo dados próximos às bordas pode haver geração de depressões ou picos nas bordas do mapa. • Formas estranhas (artefatos) podem surgir no centro das células que não contém pontos amostrados e se um número insuficiente de interações for especificado.

Quando usar	Quando não usar
<ul style="list-style-type: none"> • Para suavizar dados altamente anômalos. • Para obter uma solução única. • Para obter contornos fiéis aos dados originais. 	<ul style="list-style-type: none"> • Quando a superfície a ser modelada possuir Quebras bruscas , como por exemplo planaltos e escarpas ou montanhas e pedimentos/leques aluviais. • Quando descontinuidades como falhas ou inconformidades estiverem presentes. Estas formas podem ser modeladas por mínima curvatura desde que sejam estabelecidos os controles adequados: muitas interações e pequena convergência; estas especificações resultam em um tempo muito longo de computação.

Fonte: Landim (2000)

Tabela 4 – Características da Krigagem

KRIGAGEM	
Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Valores estimados baseiam-se no variograma; se for apropriado fornece as seguintes informações: <ul style="list-style-type: none"> - Parâmetros adequados de amostragem: número de amostras distribuição e densidade; - Parâmetros adequados de busca: tamanho da área de busca forma (circular ou elipsóide) e, se elipsóide, orientação do eixo principal; - Parâmetros adequados da grade: tamanho das células, forma e orientação; • Natureza da distribuição espacial da variável investigada, uniformidade da distribuição, importância relativa da influência espacial x casual; • Previsibilidade da variação espacial da variável avaliada. • Se o variograma for apropriado controla a krigagem, com as seguintes vantagens: 	<ul style="list-style-type: none"> • O usuário pode não compreender o uso dos controles matemáticos e apesar disto os resultados são sempre obtidos. • É necessário tempo para preparo do variograma e entendimento de geoestatística. • Pode não ser possível a construção de um variograma adequado devido à natureza da variação espacial da variável analisada. Isto pode ocorrer devido à magnitude da

<ul style="list-style-type: none"> - evita ponderação arbitrária dos pontos amostrados; - permite a determinação das melhores estimativas sem tendenciosidade: o melhor estimador é aquele que produz a melhor precisão (menor variância); - permite o estabelecimento de limites de confiança, indicando se os resultados são aceitáveis e se a estratégia de amostragem deve ser modificada; - precisão, contornos suaves, artefatos indesejáveis raros a não ser nas bordas do mapa. • Interpolador exato: o valor estimado para o nó da célula é exatamente igual ao valor amostrado naquela posição. • Estima além dos limites máximo e mínimo dos valores dos pontos amostrados. • Modela tanto tendências regionais quanto anomalias locais. • Calcula variâncias dos pontos estimados (erros), que podem ser utilizadas para: <ul style="list-style-type: none"> - quantificar um intervalo de valores (\pm) para os pontos estimados, definindo estimativas realistas; - calcular intervalos de confiança para verificar a probabilidade dos valores ocorrerem dentro de um intervalo de ± 2 unidades de desvio padrão da média; variâncias mapeadas podem indicar locais para adensamento da amostragem. 	<p>amostragem e por erro analíticos.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Requer longo tempo de computação para grupos de dados grandes ou complexos. • Necessidade de software capacitado.
<p>Quando usar</p> <ul style="list-style-type: none"> • Estiverem presentes tanto tendências regionais quanto anomalias locais. • Anomalia local não presente em toda a área, por exemplo, em ambiente fluvial. • Quiser estimar com base em uma média global. • Tiver dados irregularmente amostrados ou agrupados (clustered). 	<p>Quando não usar</p> <ul style="list-style-type: none"> • Menos de 30 pontos amostrados: número insuficiente de pares para modelar o variograma. • Erro grande e inexplicado (efeito pepita pronunciado). • Amostras de populações diversas.

Fonte: Landim (2000)

Tabela 5 – Características da Triangulação com interpolação Linear

TRIANGULAÇÃO COM INTERPOLAÇÃO LINEAR	
Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Fácil de ser entendido; • Rápido; • Fiel aos dados originais; • Bom para uma visualização rápida • Superfície pode ser interpolada entre os pontos amostrados 	<ul style="list-style-type: none"> • Valores acima ou abaixo dos valores reais não podem ser extrapolados. • Valores além da área de distribuição dos pontos amostrados não podem ser extrapolados. • Contornos podem ser 'angulares' nas bordas dos triângulos. • Gera superfícies angulares. • Rede triangular não é única e isso pode distorcer resultados.
Quando usar	Quando não usar
<ul style="list-style-type: none"> • Distribuição de dados bem regular; • Valores estimados necessários apenas dentro da área amostrada; • Presença de grandes diferenças entre os dados (encostas íngremes, dados de contaminação com grande variabilidade); • Dados topográficos 	<ul style="list-style-type: none"> • Ao se desejar um mapa com contornos suaves; • Alguns dados coletados em linhas e outros com distribuição irregular; • Com grande volume de dados computação pode tornar-se lenta.

Fonte: Landim (2000)

Tabela 6 – Características do método Vizinho mais próximo

VIZINHO MAIS PRÓXIMO	
Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • É um interpolador de rápido processamento; • É de fácil implementação; • Útil para o preenchimento de lacunas nos dados em casos onde os dados estão próximos em uma malha, com muitos valores em falta. 	
Quando usar	Quando não usar
<ul style="list-style-type: none"> • Quando os dados já estão espaçados regularmente; • Deve ser usado quando se deseja manter os valores de cotas das amostras na grade, sem gerar valores intermediários. 	Quando se pretende usar imagens de radar, este método não é recomendado pois pode conduzir a “artefatos” e a estatísticas distorcidas.

Krajewski e Gibbs² (1966, APUD LANDIM, 2000) demonstram comparações entre alguns algoritmos, conforme pode ser visualizado na tabela abaixo (tabela 8):

Tabela 7 – Comparação entre algoritmos

Algoritmo	Fidelidade aos dados originais	Suavidade das curvas	Velocidade de computação	Precisão geral
Triangulação	1	5	1	5
Inverso da Distância	3	4	2	4
Superfície/ Tendência	5	1	3	2
Mínima Curvatura	4	2	4	3
Krigagem	2	3	5	1

1 = melhor → 5 = pior

Fonte : Landim (2000)

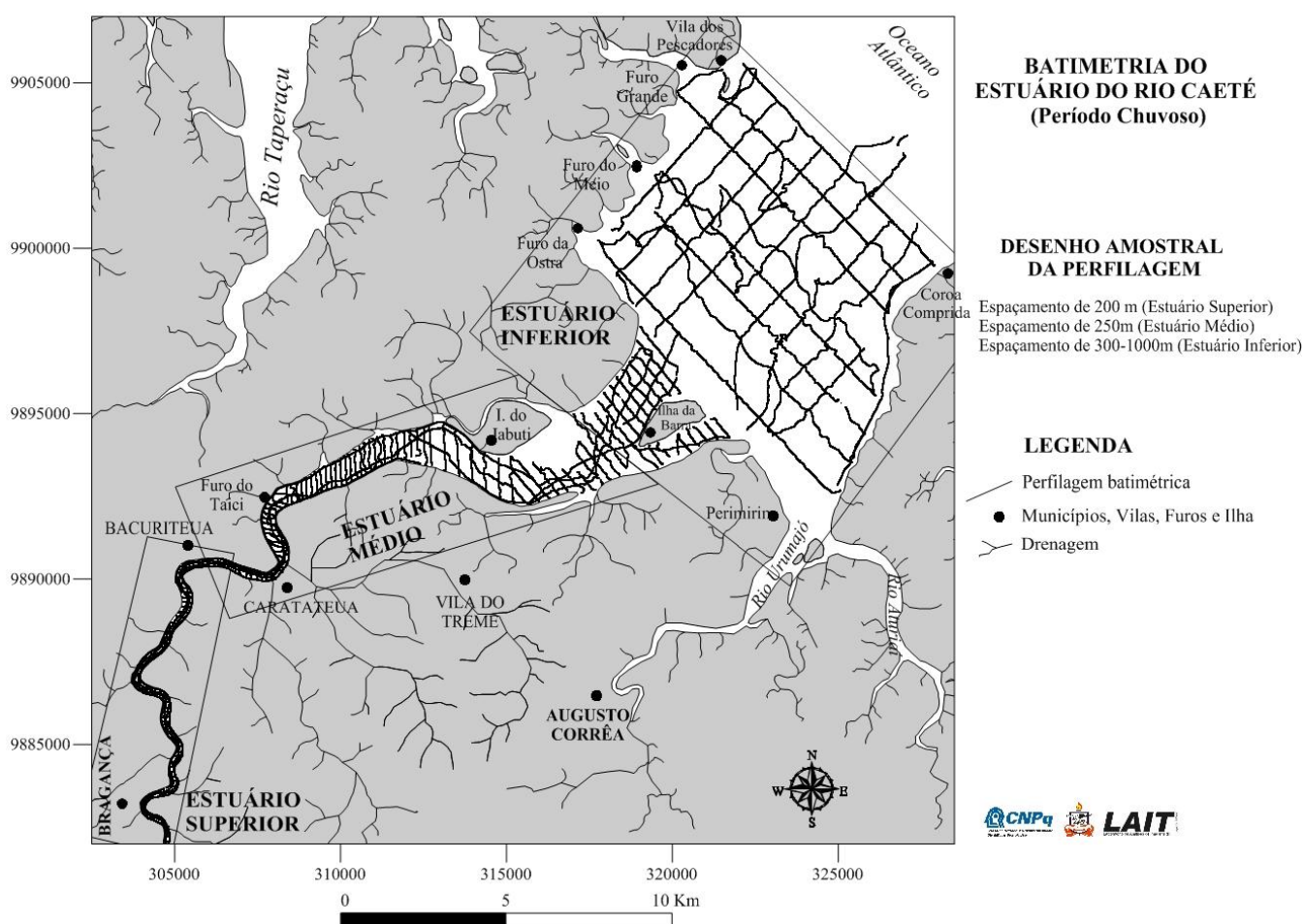
² KRAJEWSKI, S.A. & GIBBS, B.L. – Understanding Contouring: A practical Guide to Spatial Estimation and Contouring Using a Computer and Basics of Using Variograms: Gibbs Associates, 1966

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 COLETA DOS DADOS

A malha de perfilagem foi definida em etapa anterior ao levantamento batimétrico, a partir de uma base cartográfica georeferenciada/digitalizada com projeção UTM, zona 23, datum WGS 84, tendo como plano de fundo a imagem óptica LANDSAT ETM+7, composição colorida 3R2G1B. Desse modo, planejou-se o desenho amostral da perfilagem (espaçamento entre os perfis e número de linhas transversais e longitudinais ao canal estuarino), vide figura 22, utilizando o programa *Hypack[®]Max*.

FIGURA 22 – Perfilagem batimétrica e espaçamento entre perfis.



A perfilagem batimétrica foi executada pelo método acústico com a utilização de um ecobatímetro marca ODEC, modelo Bathy 500MF, sistema analógico/digital, operando na frequência de 200 kHz, conectado a um DGPS marca Trimble, modelo Ag 132 com correção

diferencial em tempo real via satélite e/ou sinal *beacon* da Marinha do Brasil, e a um notebook com duas portas seriais de entrada de dados, interfaceado com o programa *Hypack[®]Max*, para o monitoramento, armazenamento, e a sincronização dos dados adquiridos tanto pelo ecobatímetro quanto pelo DGPS.

Este levantamento foi realizado no final do regime pluviométrico chuvoso (mês de maio) em embarcação de pequeno calado, a motor, tipo: lancha voadeira de alumínio, no setor superior e médio, região mais abrigada e rasa. E no setor inferior, mais desabrigado dos fortes ventos e canais mais profundos foi utilizado um barco de madeira. A razão da utilização desses dois tipos de barcos para as respectivas áreas foram as mesmas do experimento anterior. A sondagem foi realizada no estágio de maré alta para a perfilagem das áreas rasas. Simultaneamente à perfilagem foram medidas a altura da maré nos três setores, a cada cinco minutos. No setor superior os dados de variação de maré foram registrados a partir do método “*alternativo*” através da leitura da altura do nível da água em régua fixa, graduada, instalada no trapiche municipal de Bragança. No setor médio, o registro foi realizado em um marégrafo digital instalado no trapiche da fábrica de gelo, no município de Bacuriteua. E no setor inferior a amplitude de maré, foi registrada através de um transdutor de nível d’água digital (marca OTT, modelo *Orphimedes*), instalado na ponte do Furo do Maguari, na Vila Bonifácio (figura 22).

Após a etapa de campo, os resultados de profundidade obtidos receberam os tratamentos devidos no programa *Hypack[®]Max* (redução dos dados para uma mesma situação de maré de baixa-mar). Assim, gerou-se um arquivo com a extensão .dat, composto de três colunas: x (longitude), y (latitude) e z (profundidade).

5.2 PROCESSAMENTO DOS DADOS

A etapa de processamento dos dados iniciou-se com o programa *Surfer[®]9*.

a) Primeiramente, foi aberto o arquivo de dados originais: “Dados Totais_AbrilMaio2005_PChuvoso.dat” com a finalidade de obter os resultados estatísticos da variável de Z (valores máximos e mínimos).

b) Em seguida foram plotados a distribuição dos pontos no MAP → NEW → POST MAP → NEW POST MAP para calcular os limites da área de coleta dos pontos e definir o tipo de amostragem de dados.

c) Foram gerados doze (12) *grids* no GRID → DATA → arquivo “Dados Totais_AbrilMaio2005_PChuvoso.dat” no modo default de espaçamento, para cada método de interpolação disponível no Surfer[®]9, para a confecção dos mapas de contorno. Para cada *grid* gerado foi obtido um relatório do processamento (*Gridding Report*) com inúmeras informações sobre características de cada interpolador, além do tempo estimado de cada interpolação e etc.

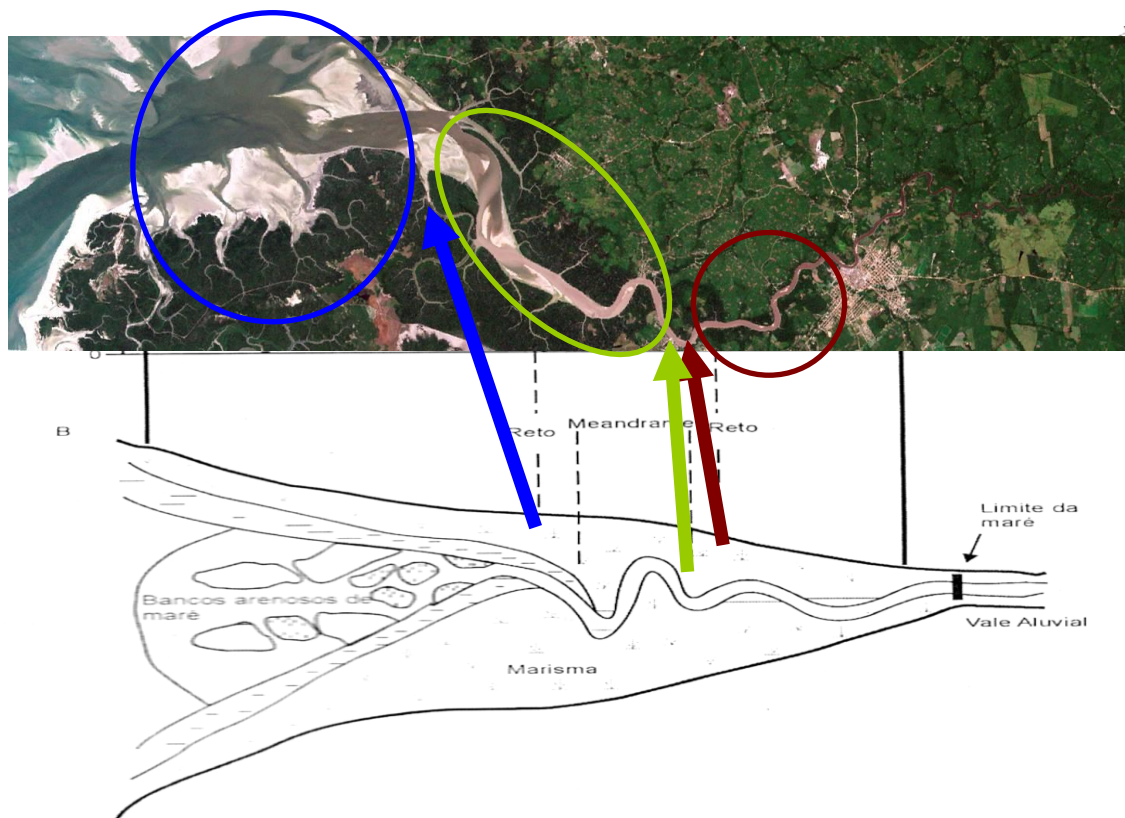
d) Cada *grid* foi plotado no MAP → CONTOUR MAP → NEW CONTOUR MAP → exemplo: arquivo “Inverse Distance to a Power.grd”. Após a plotagem de todos os *grids* foi possível comparar visualmente os contornos gerados e obter os dados limites (máximos e mínimos) dos níveis de contorno a fim de comparar com os dados originais que foram calculados a estatística e selecionar os melhores resultados gerados pelos diferentes métodos de interpolação.

e) Depois de selecionados os *grids* gerados no modo default de espaçamento, os mesmos foram processados no programa Global Mapper[®]10.01. Assim, os dados digitais no formato .grd foram abertos no programa na seguinte configuração de projeção: UTM_WGS84_Zona 23 Sul e com o *grid* foi adicionado um shapefile (.shp) da área de contorno com o objetivo de reagrupar (resolução espacial) apenas a área interna do polígono com o espaçamento de 5 m. O shapefile foi digitalizado no programa ArcGIS 9.2.

Com o término desta etapa, repetiu-se o procedimento anterior [a), b), c), d)] para cada arquivo digital reagrupando para 5 m no item e). Assim, foi selecionado o método de interpolação que melhor representou o modelado batimétrico.

As etapas descritas acima foram efetuadas usando o processamento para a área inteira - como um todo. Por sua vez, percebeu-se a necessidade de realizar o processamento descrito acima para cada setor do estuário, baseado nos distintos padrões de amostragem de dados batimétricos realizados na área (figura 23), comparado com a subdivisão proposta por Woodroffe (1986, 1989) e de acordo com a morfologia do estuário dominado por maré determinado por Dalrymple et al (1992).

FIGURA 23 – Padrão morfológico do estuário do rio Caeté comparado com a morfologia do estuário dominado por maré estabelecido por Dalrymple et al (1992).



Dessa maneira, o arquivo de dados original: Período_Chuvoso_Maio2005.shp foi “clipado” para cada setor do estuário, usando um shapefile de contorno, compartimentando assim três grandes setores: estuário superior, médio e inferior, usando o programa ArcGIS 9.2, aplicando a função clip do ArcToolbox → Analysis Tools.

Após, a compartimentação dos três setores, repetiu-se todas as etapas descritas acima para cada setor (item [a), b), c), d) e e]), usando-se apenas o método de interpolação selecionado, testando apenas diferentes resoluções espaciais definidas para cada setor, conforme o espaçamento entre os perfis, usando-se o programa Global Mapper® 10.01.

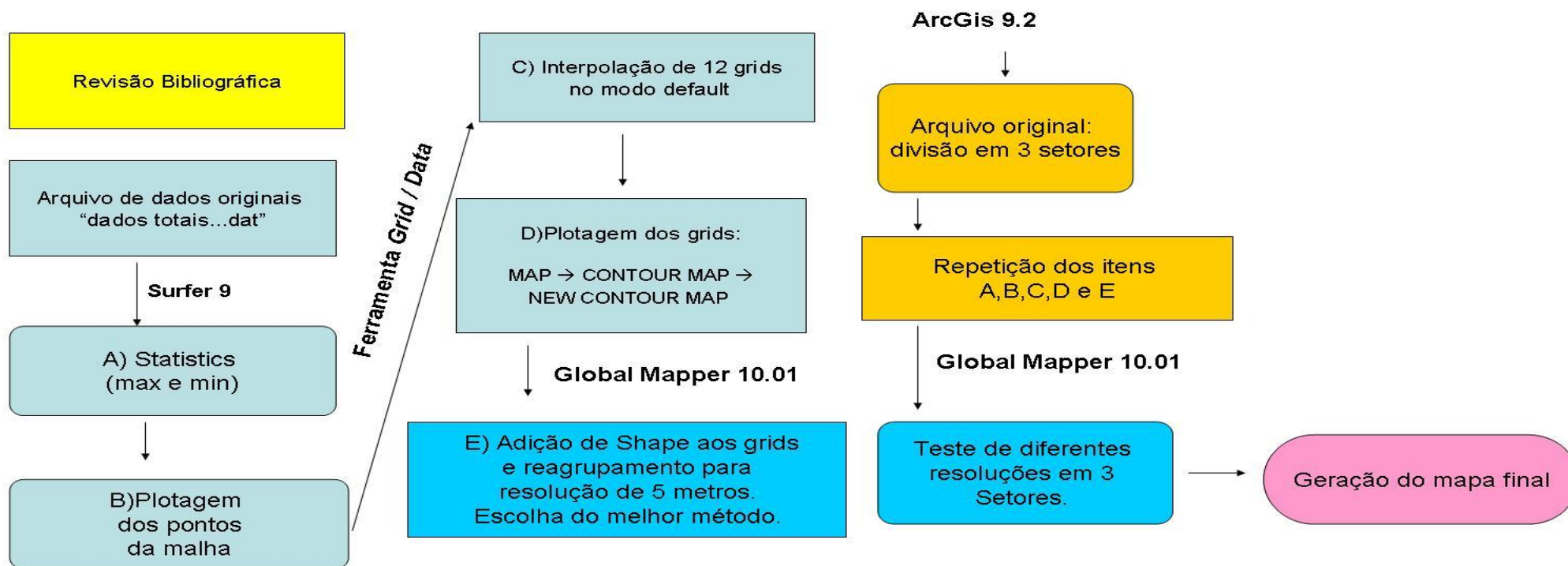
Para o setor superior do estuário o espaçamento é de aproximadamente 200 m, assim testou-se com uma resolução espacial de: modo default, 1, 2.5 e 5 m.

No setor médio do estuário com espaçamento de aproximadamente 250 m a resolução espacial usada foi: modo default, 5, 3.125 e 2.5 m.

E, no setor inferior do estuário com espaçamento aproximadamente entre 300 m e 1000 m a resolução espacial testada foi de: modo default, 12.5, 10, 5 e 3.75m.

Resumindo a metodologia em um fluxograma (figura 24), observa-se o seguinte esquema:

FIGURA 24 – Fluxograma demonstrando a metodologia seguida.



6 RESULTADOS

6.1 MALHA AMOSTRAL

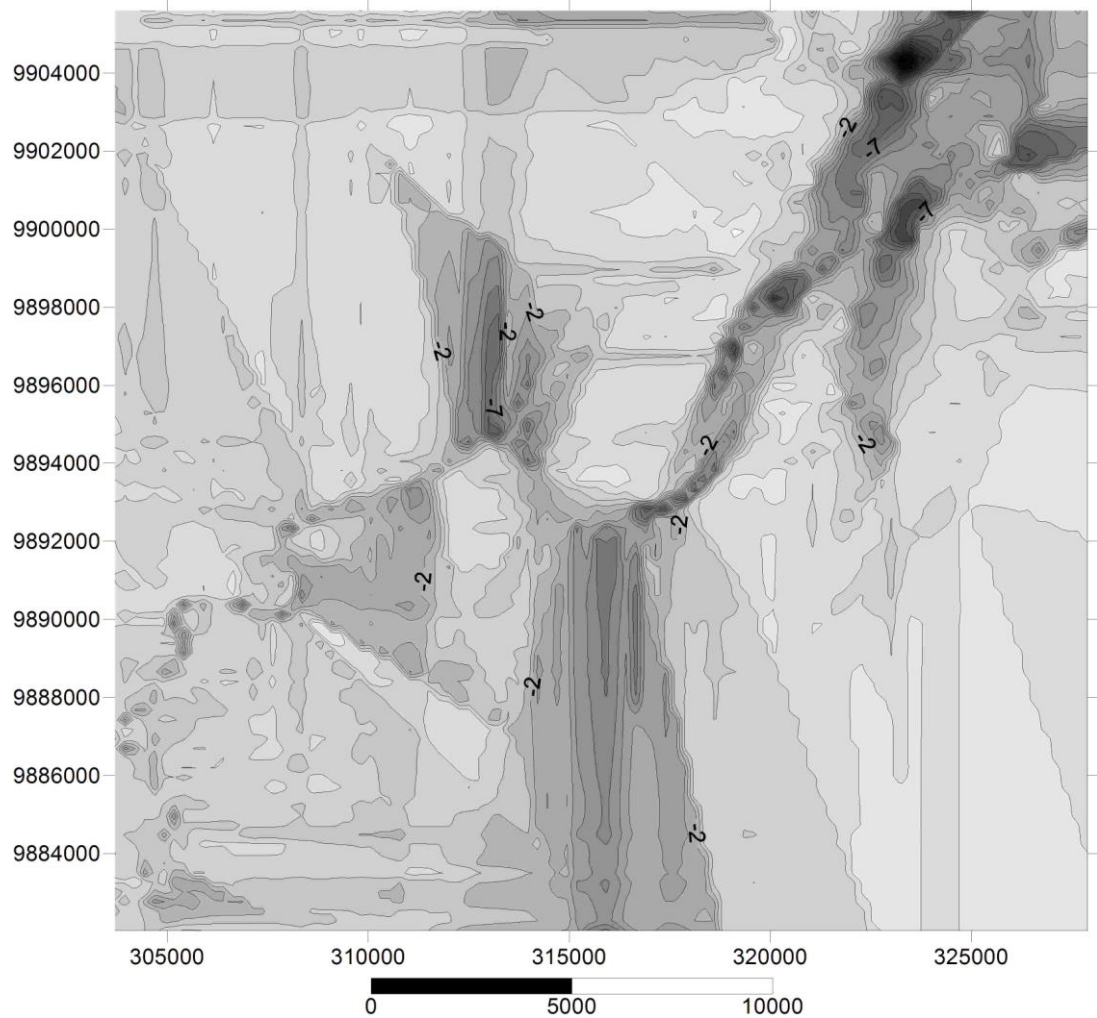
Após a plotagem dos dados batimétricos no Surfer, verificou-se que o delineamento da amostra é de configuração agregada, devido à existência de grupos de pontos próximos entre si, e irregular, pois os pontos obtidos em toda a extensão do estuário não estão dispostos no mesmo espaçamento.

6.2 MAPAS COM RESOLUÇÃO “DEFAULT”

O valor dos dados de batimetria originais, após a correção de maré em estuário de baixamar foram de -17.31 metros (valor mínimo) e 3.78 metros (valor máximo). Estes valores originais, foram comparados com os valores obtidos através interpolação de cada método. A resolução *default*, ou seja, a resolução padrão que o programa Surfer oferece, para todos os métodos foi de 244 metros para o eixo x e de 245 metros para o eixo y.

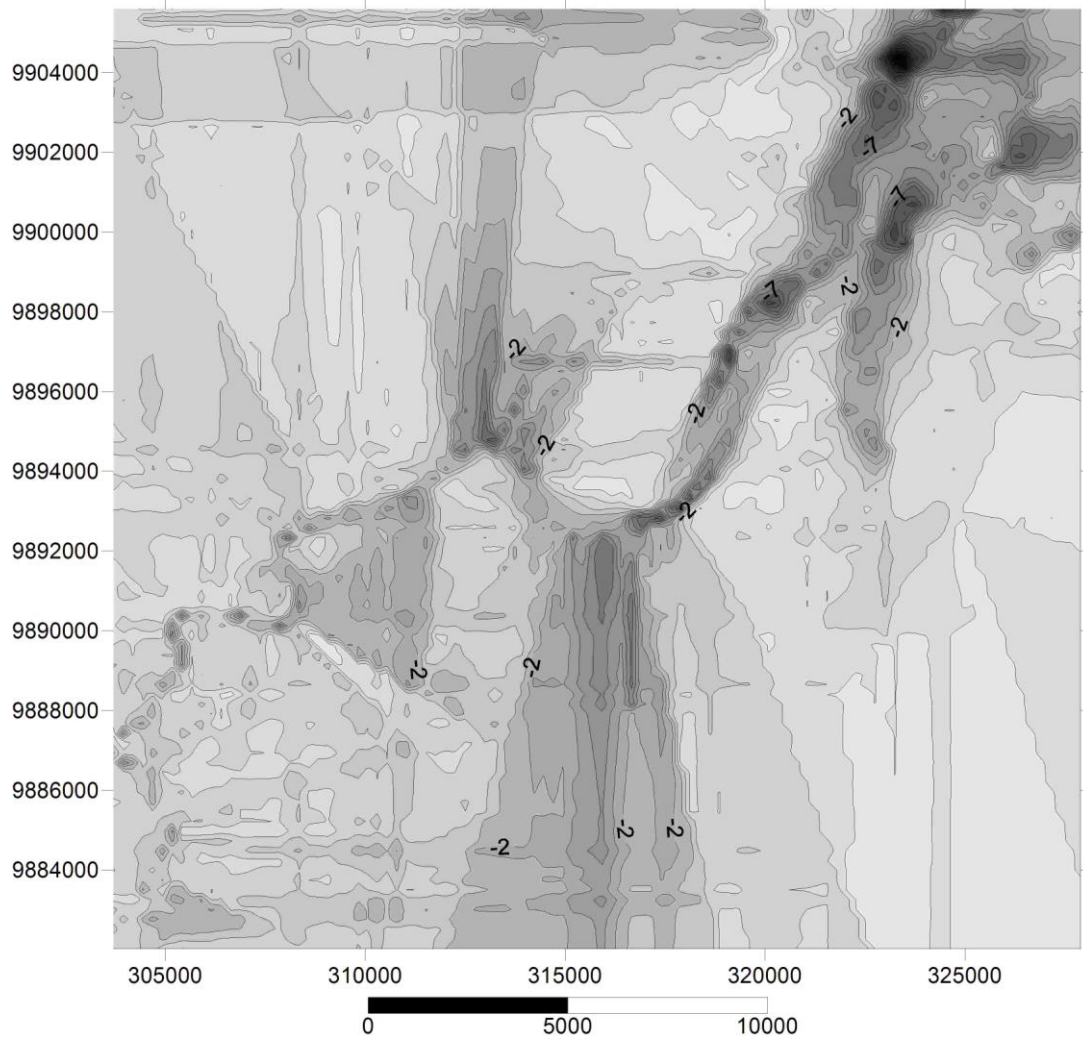
O mapa de contorno gerado pelo método do “inverso da distância” (figura 25), usando espaçamento *default*, apresentou valores de profundidade próximos aos originais. Os valores mínimo e máximo obtidos foram de - 16.62 metros e 3.23 metros, respectivamente. O tempo de processamento do grid foi de 117.1 segundos. Visualmente apresentou um resultado satisfatório, apesar de alguns dados terem sido extrapolados durante a interpolação.

FIGURA 25 – Mapa de contorno gerado através do “Inverso da distância”. Escala em metros.



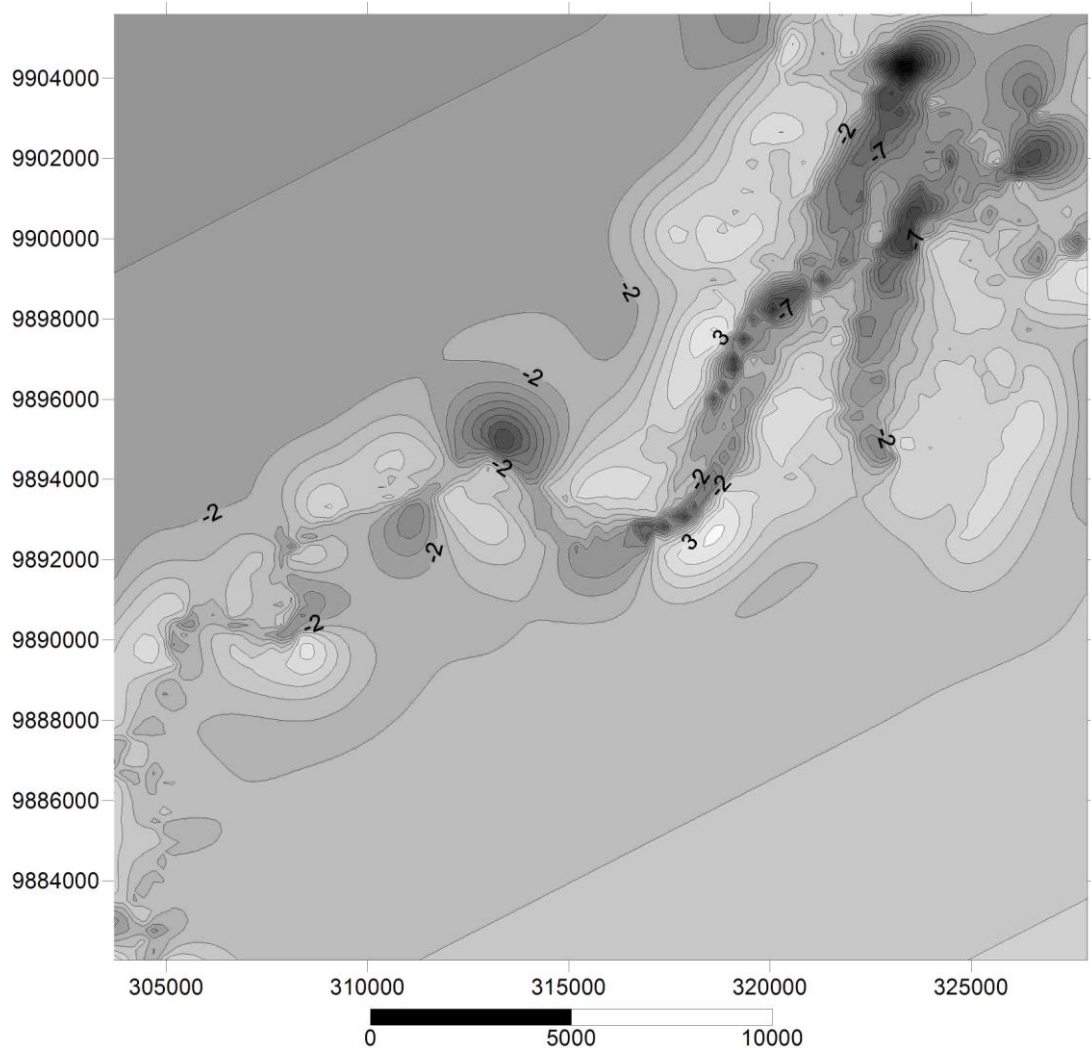
O método “Krigagem” (figura 26) também apresentou valores próximos aos do original. Os valores mínimo e máximo obtidos foram de -16.59 metros e 3.08 metros respectivamente. O tempo para processamento durou 120 segundos. Visualmente o resultado também foi satisfatório, sendo que o mapa de contorno gerado se assemelhou ao que foi resultante do inverso da distância, porém com mais linhas de contorno.

FIGURA 26 – Mapa de contorno gerado pelo método da Krigagem. Escala em metros.



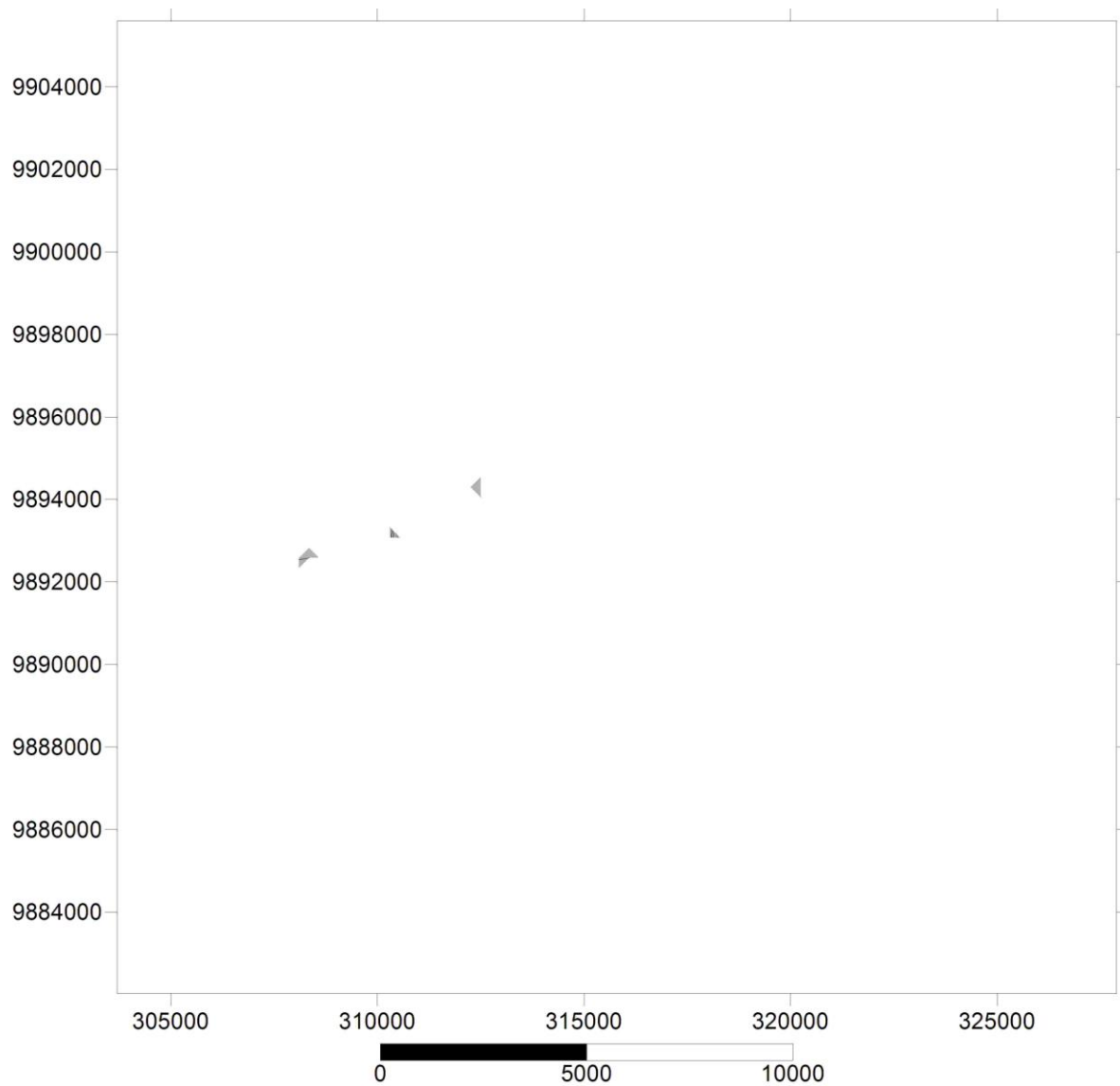
O método de “curvatura mínima” apresentou valores mínimos e máximos próximos aos do dado original. O valor mínimo foi de -16.35 metros e o máximo de 4.20 metros. Percebe-se, entretanto, que o valor máximo apresentado por este método ultrapassou o valor máximo original, que é de 3.78 metros. O tempo para processamento do grid durou apenas 39 segundos, apresentando-se como um método de rápido processamento. Observando o mapa gerado (figura 27), verifica-se que não houve grandes extrapolações dos dados e as linhas de contornos geradas foram bem suaves.

FIGURA 27 – Mapa de contorno obtido através do método Mínima curvatura. Escala em metros.



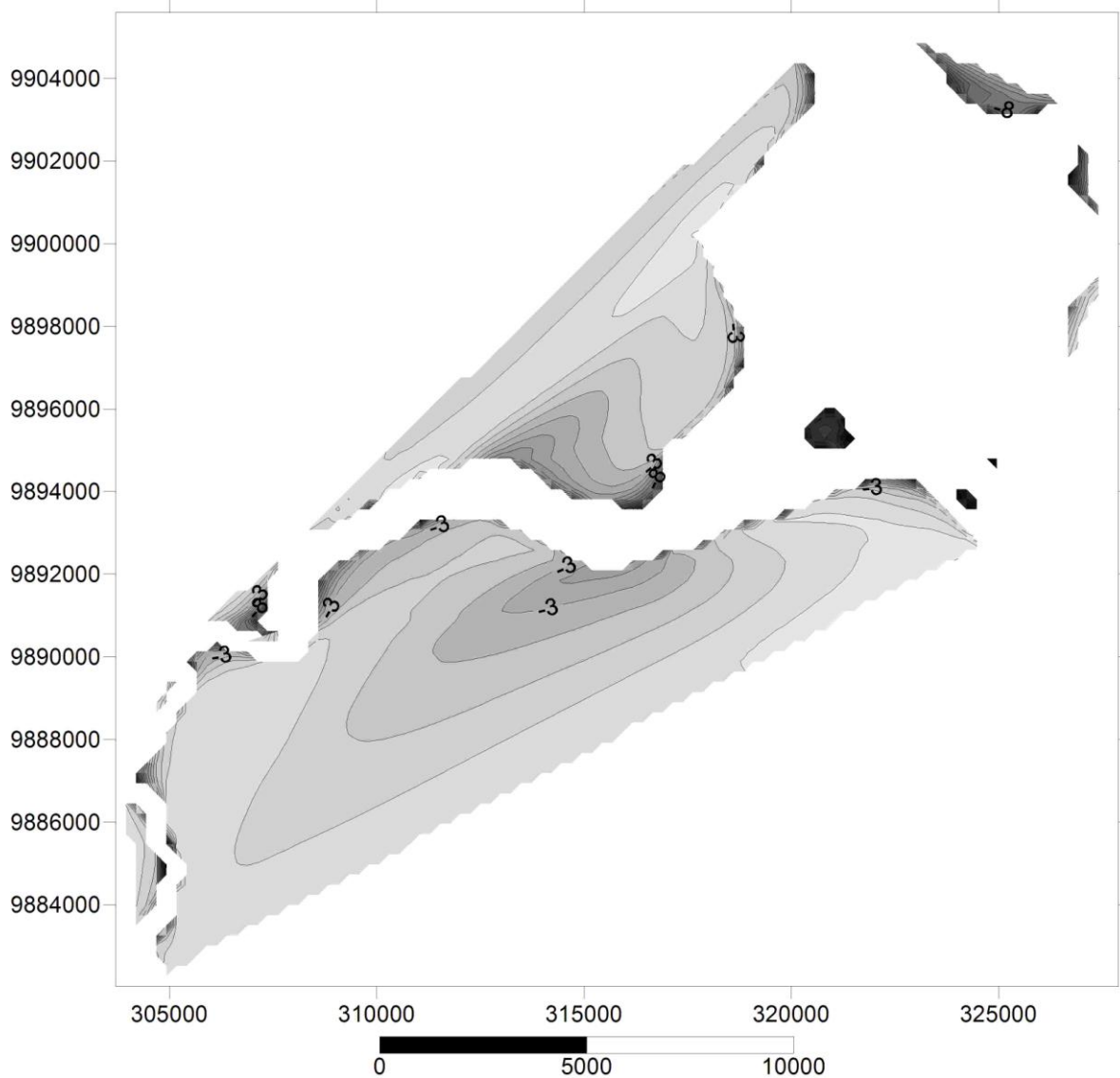
Em relação ao método de “Shepard modificado”, os valores mínimos e máximos obtidos após a interpolação foram de -5000 metros e 16000 metros, respectivamente. Nota-se que em comparação com os dados originais, estes foram valores muito arbitrários, ou seja, fogem do padrão dos dados originais. O tempo de processamento do grid foi de 31.4 segundos. Através da visualização do mapa, nota-se que praticamente não foi gerada nenhuma linha de contorno, observando-se apenas algumas formas geométricas indistintas (figura 28).

FIGURA 28 – Método de Shepard modificado aplicado ao grid. Escala em metros.



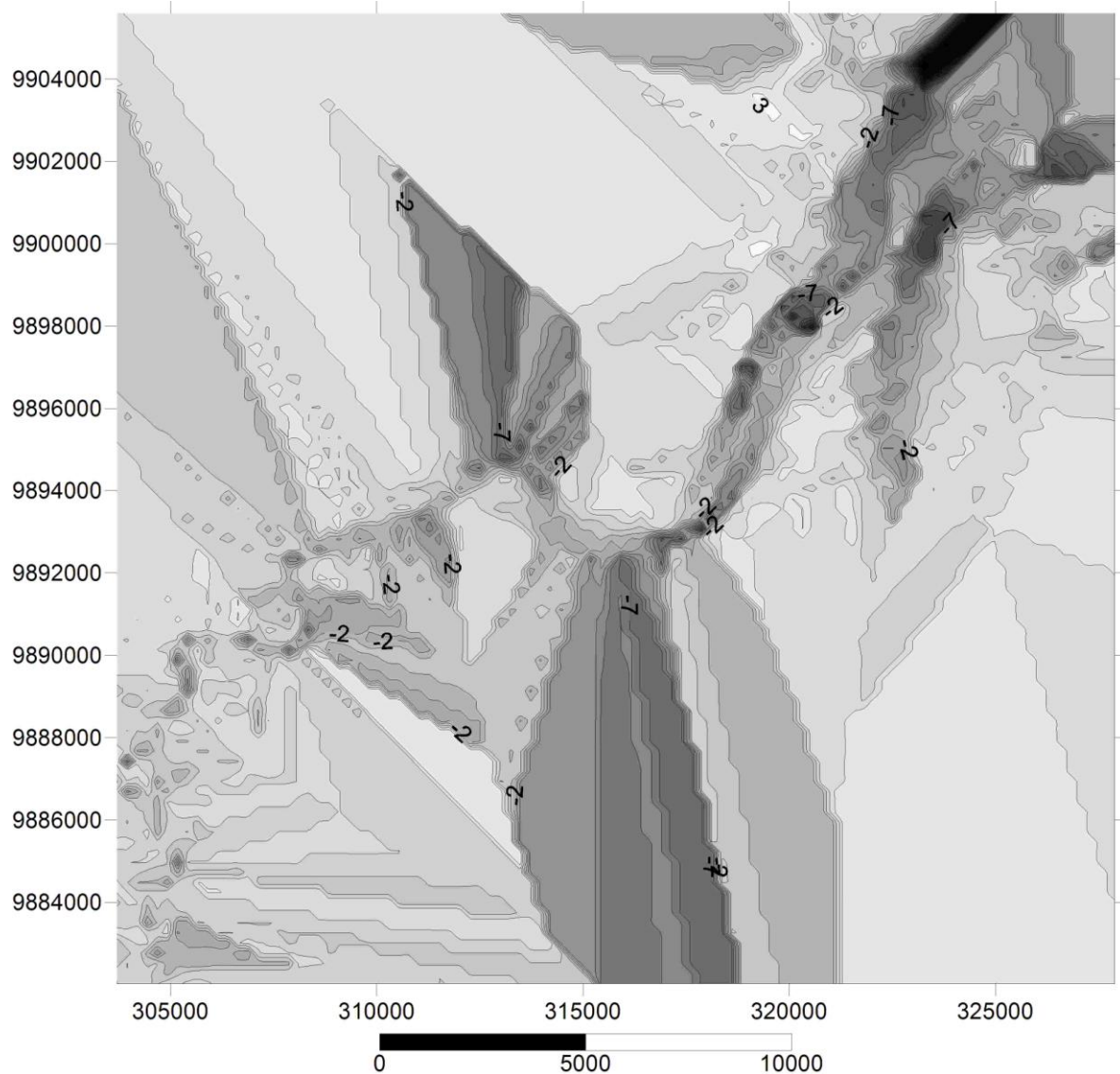
Quanto ao método “Vizinho Natural”, os valores após interpolação foram de - 17.28 metros e de 3.74 metros, mínimo e máximo, respectivamente. Estes valores foram muito próximos aos originais. O tempo para processamento do grid foi de 24.7 segundos. Visualizando-se o mapa, percebe-se que a área do estuário não obteve linhas de contorno, sendo estas geradas para fora da área da malha de amostragem (figura 29).

FIGURA 29 – Linhas de contorno geradas pelo método “Vizinho natural”. Escala em metros.



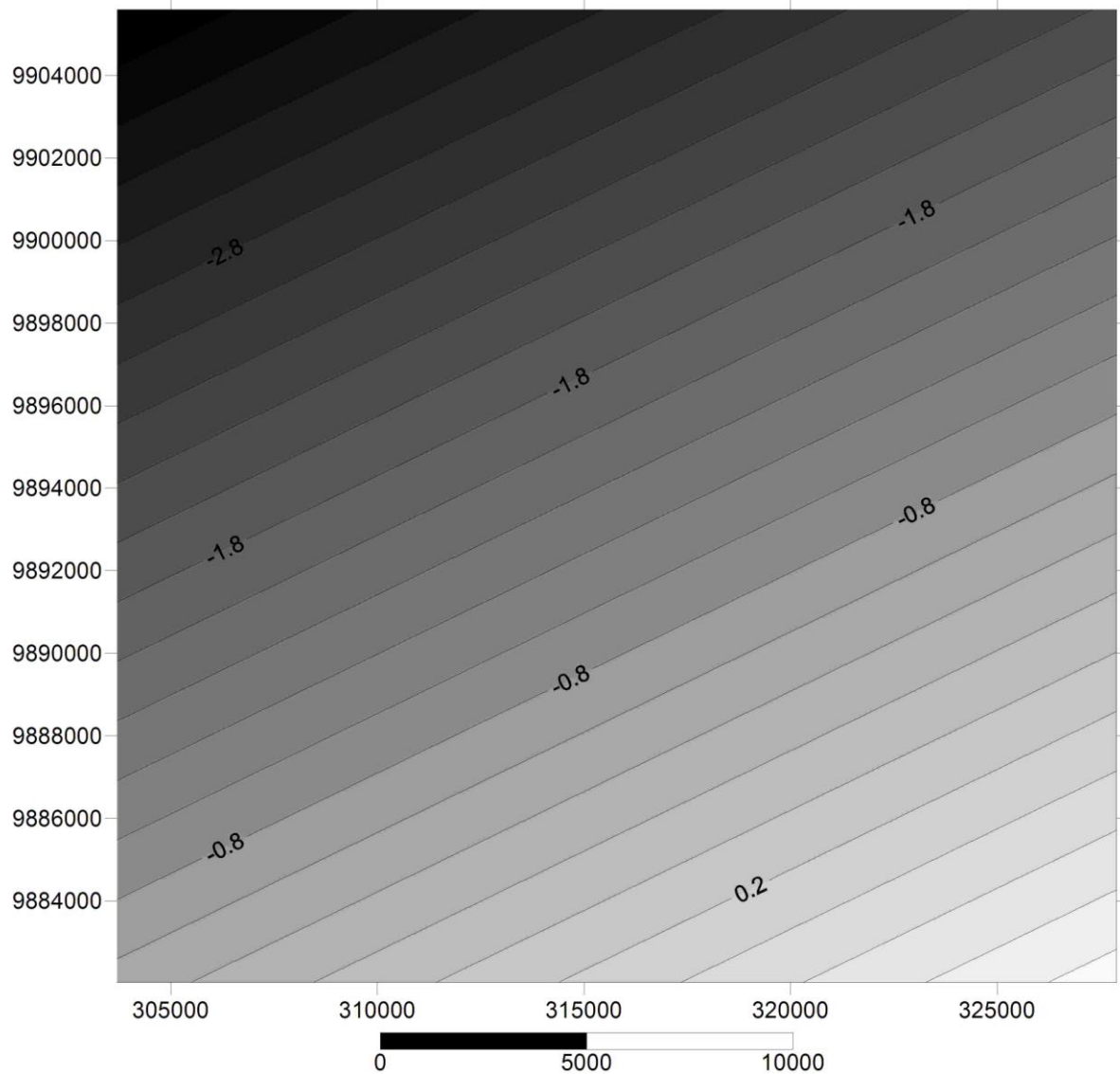
O mapa de contorno gerado pela interpolação “vizinho mais próximo” apresentou valor mínimo de -16.71 metros e valor máximo de 3.43 metros. O tempo decorrido para geração do grid de interpolação foi de 56.5 segundos. Visualmente, nota-se extrapolação de dados em todo o grid, se levarmos em consideração a área do estuário. Houve geração de formas geométricas com padrões serrilhados (figura 30) e áreas do grid com linhas de contorno bem próximas umas das outras além de outras áreas com linhas de contorno isoladas.

FIGURA 30 – Mapa de contorno gerado pelo método de interpolação “vizinho mais próximo”. Escala em metros.



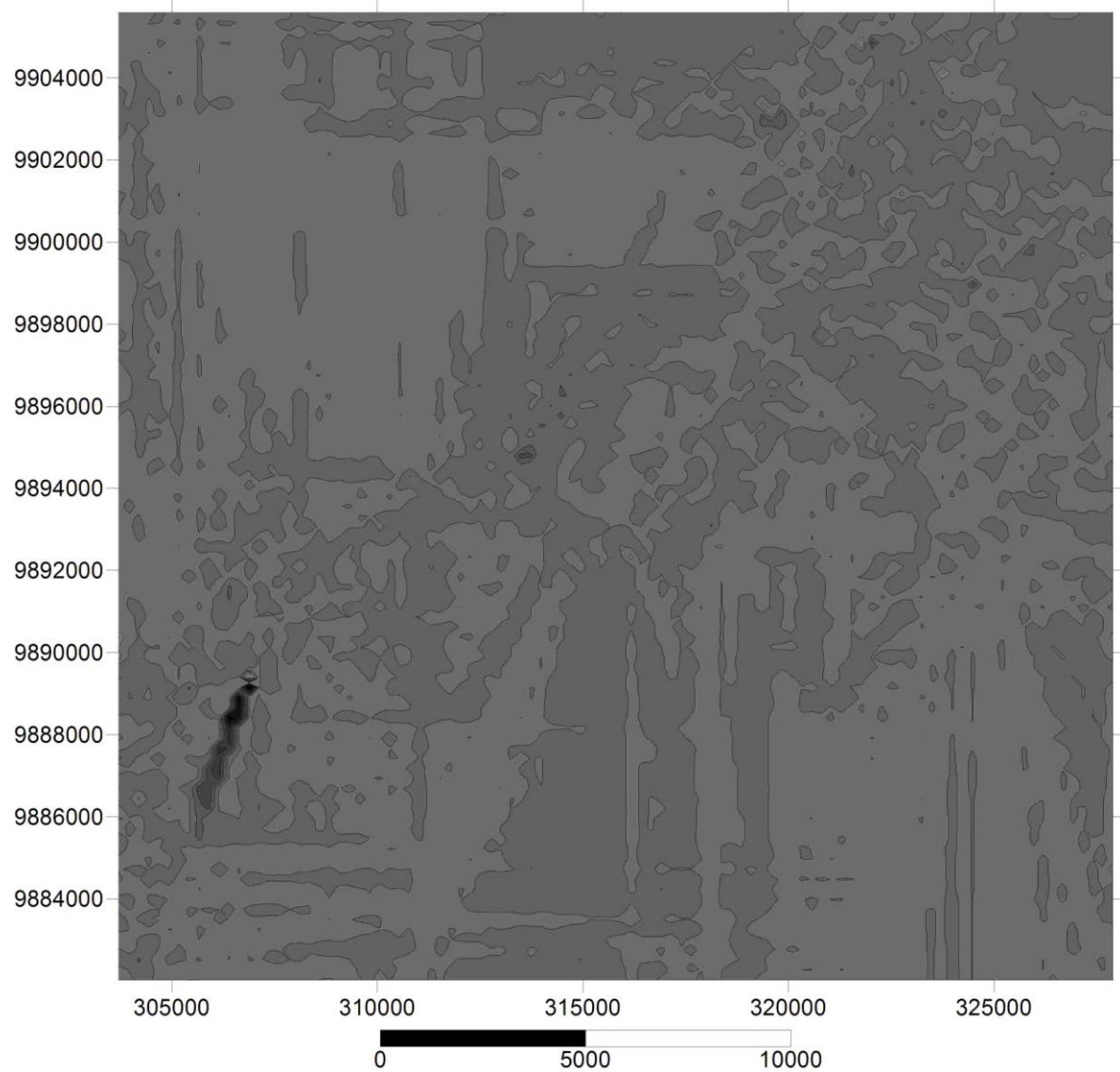
O método da “regressão polinomial” apresentou valores de profundidade arbitrários, longe dos valores reais obtidos em campo. Os valores mínimos e máximos foram respectivamente, -3.79 metros e 1.11 metros. O tempo gasto para geração do grid foi de 0.64 segundos. O grid gerado (figura 31) mostra várias linhas paralelas umas às outras, com diferentes valores, mas nenhuma linha de contorno apreciável para interpretação da área.

FIGURA 31 – Mapa de contorno gerado pela regressão polinomial. Observa-se um padrão de linhas paralelas apenas. Escala em metros.



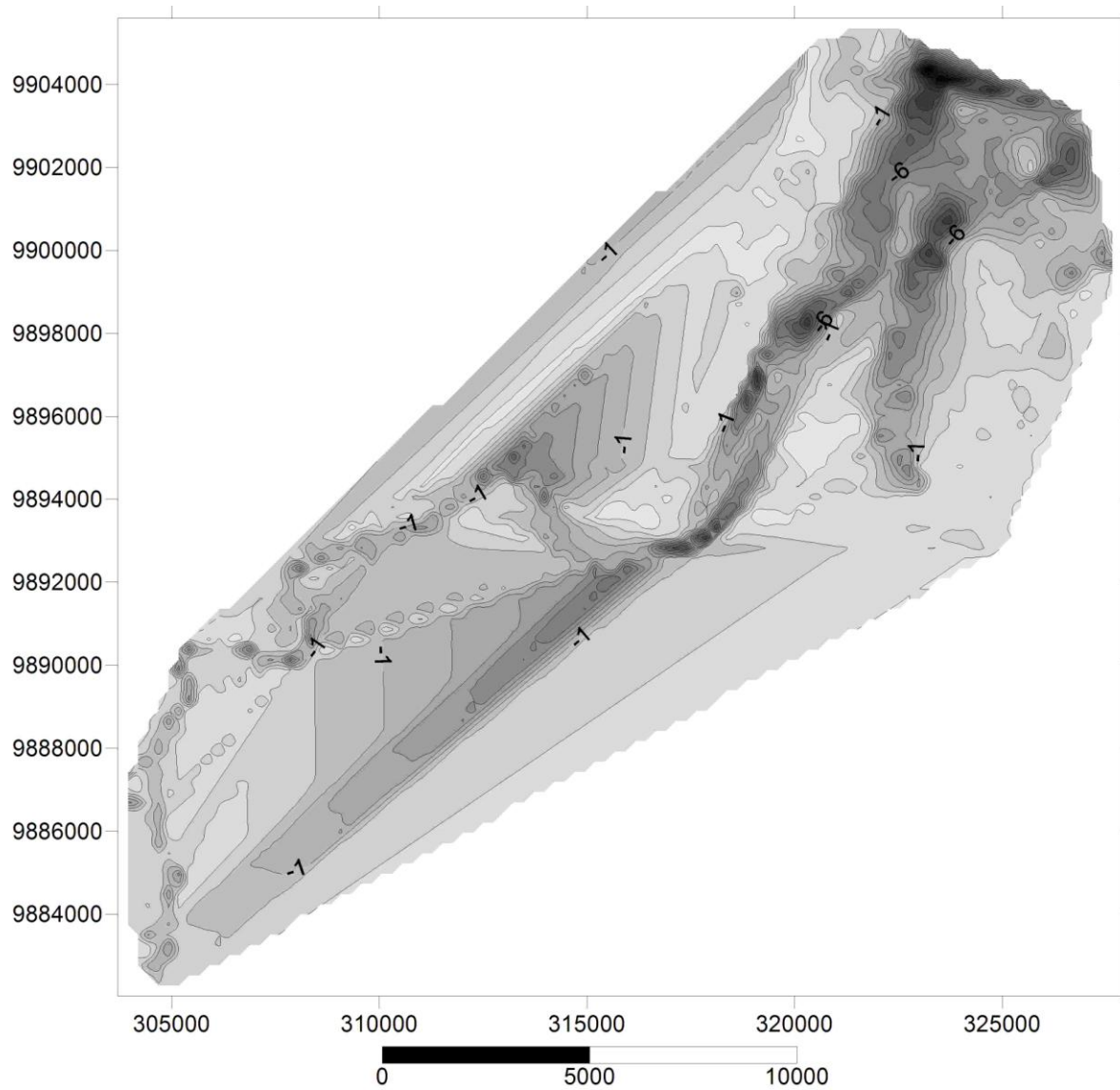
O grid gerado pelo método “função da base radial”, apresentou valores mínimos e máximos de - 450 metros e 572 metros, respectivamente. O tempo de interpolação foi de 300 segundos. O mapa gerado apresentou um padrão “zebrado” (figura 32), que se distribui por todo o grid.

FIGURA 32 - Grid gerado pelo interpolador função da base radial. Escala em metros.



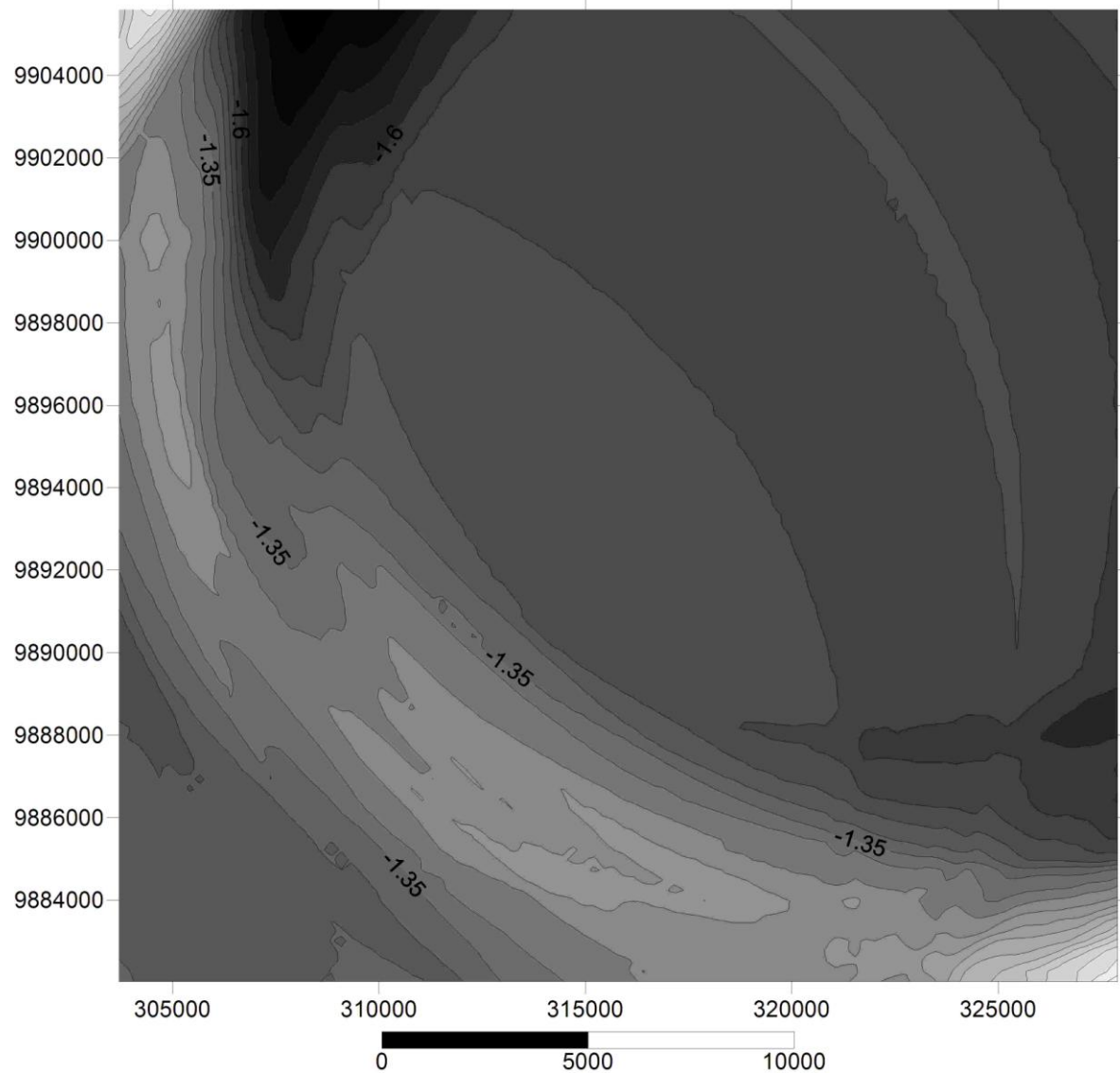
O método interpolador “triangulação com interpolação linear” gerou resultados com valor mínimo de -15.79 metros e máximo de 3.06 metros. O tempo para processamento do grid levou cerca de 7 segundos para ser gerado. Visualmente, o grid gerado (figura 33) não apresentou uma grande extrapolação dos dados, porém algumas linhas de contorno ficaram cortadas nas bordas do grid, bordas estas que apresentaram um padrão “serrilhado”.

FIGURA 33 - Mapa gerado pelo interpolador “triangulação com interpolação linear”. Escala em metros.



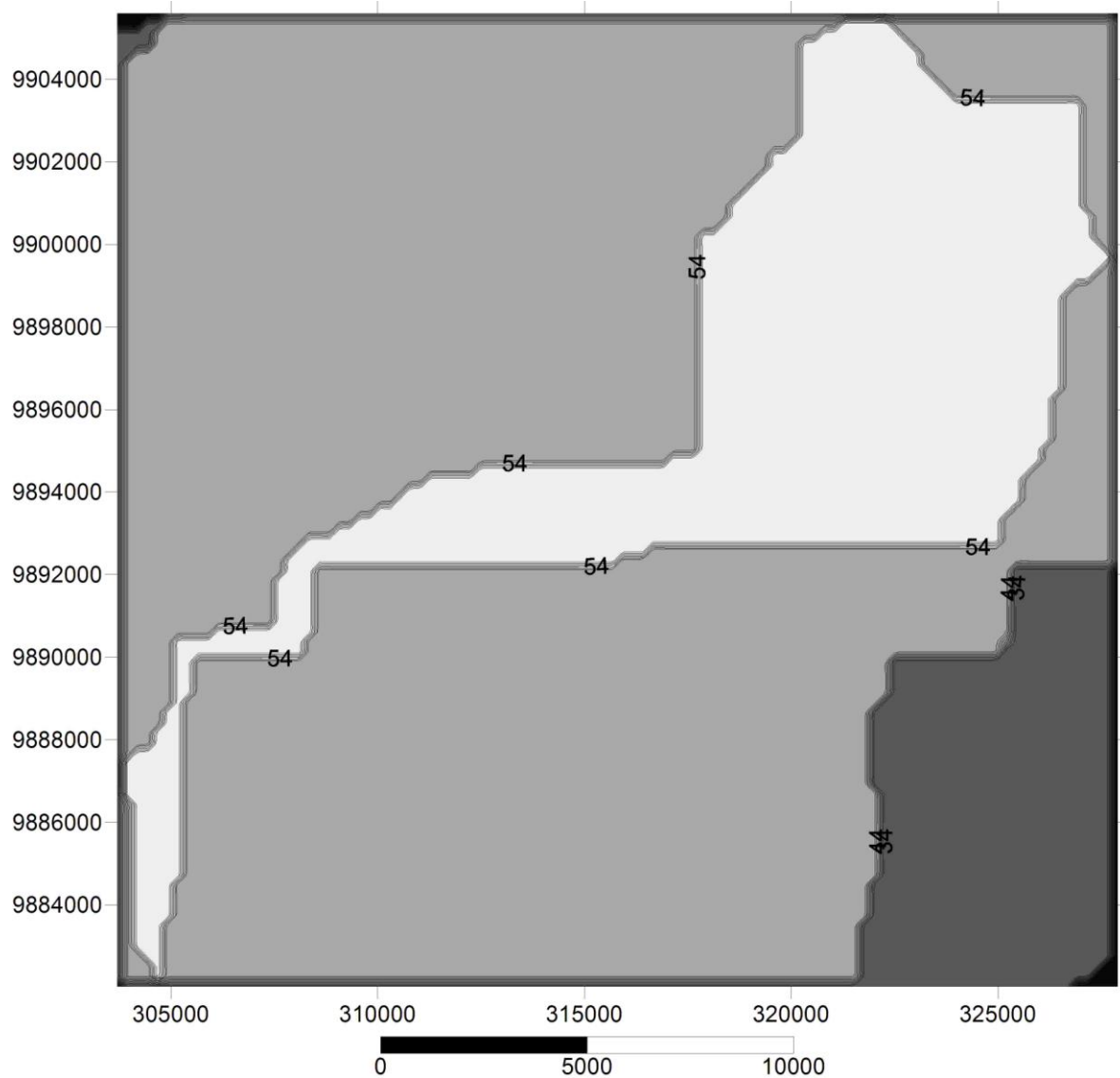
O resultado do grid gerado pelo método “Média móvel” demonstrou valor mínimo de - 1.83 metros e máximo de 0.72 metros. O tempo para interpolação foi de 28.4 segundos. O grid gerado (figura 34) mostra uma padrão de curvas e parábolas, que se distribuem por toda a área do grid.

FIGURA 34 - Mapa gerado através do método “média móvel”. Escala em metros.



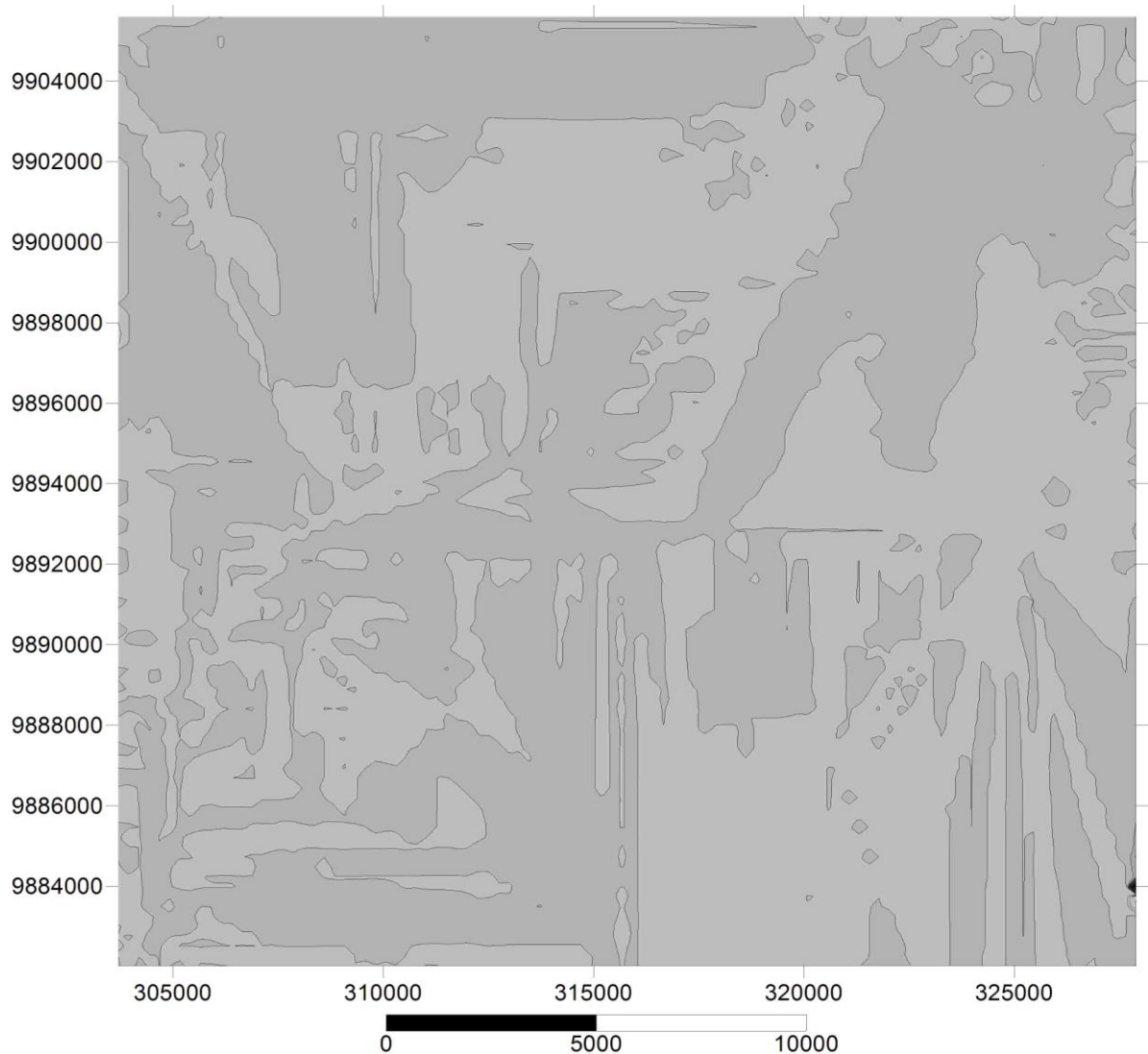
Em relação ao método “Dados métricos”, obtiveram-se após a interpolação, valores mínimos e máximos de 16 metros e 64 metros, respectivamente. O tempo decorrido para geração do grid foi de 133 segundos. O grid criado (figura 35), apresentou um padrão do tipo geométrico com várias linhas de contorno gerando o desenho da forma do estuário, além de outras linhas dispostas nos cantos do superior esquerdo e inferior direito do grid.

FIGURA 35 - Grid gerado através do interpolador “Dados métricos”. Escala em metros.



O método “Polinômio local” gerou um grid com valores mínimo e máximo de - 34717 metros e 11314 metros, respectivamente. O tempo de processamento do grid foi de 117.7 segundos. No grid (figura 36), verifica-se que a maioria das linhas de contorno geradas possuem o valor de zero, que se distribui por toda a área do grid.

FIGURA 36 - Mapa de contorno gerado através do método “Polinômio local”. Escala em metros.



6.3 MAPAS GERADOS COM RESOLUÇÃO DE 5 METROS

Os métodos de interpolação escolhidos, para geração de grids com resolução de 5 metros, foram os métodos Inverso da distância, Krigagem, Mínima curvatura, Vizinho mais próximo e Triangulação com interpolação linear. Estes métodos foram escolhidos levando-se em consideração a fidelidade dos dados obtidos após a interpolação usando cada um, relacionando-se com os dados coletados em campo, após a geração dos grids no modo “*default*” de espaçamento.

O resultado dos valores mínimos e máximos obtidos após o uso de cada interpolador na resolução de 5 metros, pode ser visualizado na tabela seguinte (tabela 8):

Tabela 8 – Valores mínimos e máximos de cada interpolador após geração do grid.

RESULTADOS ESTATÍSTICOS - PROFUNDIDADE (Z) – Min = -17.31 m Máx. = 3.78 m	RESOLUÇÃO ESPACIAL			
	(Default) X= 244.3438384m Y= 245.4461458m		X=Y=5m	
INTERPOLADORES	Mín	Máx	Mín	Máx
Inverso da distância	-16.62	3.23	-16.61	3.22
Krigagem	-16.59	3.08	-16.57	3.07
Mínima Curvatura	-16.35	4.20	-16.34	3.63
Vizinho mais próximo	-16.71	3.43	-16.70	3.24
Triangulação com interpolação linear	-15.79	3.06	-15.78	3.06

Quanto ao aspecto visual, poucas diferenças puderam ser notadas entre os 5 interpoladores selecionados (figuras 37 a 41), para a resolução aplicada. Abaixo, os mapas de contorno gerados a partir dos grids dos 5 interpoladores:

FIGURA 37 - Mapa de contorno gerado pelo método “Inverso da distância”, com aplicação de resolução de 5 metros. Escala em metros.

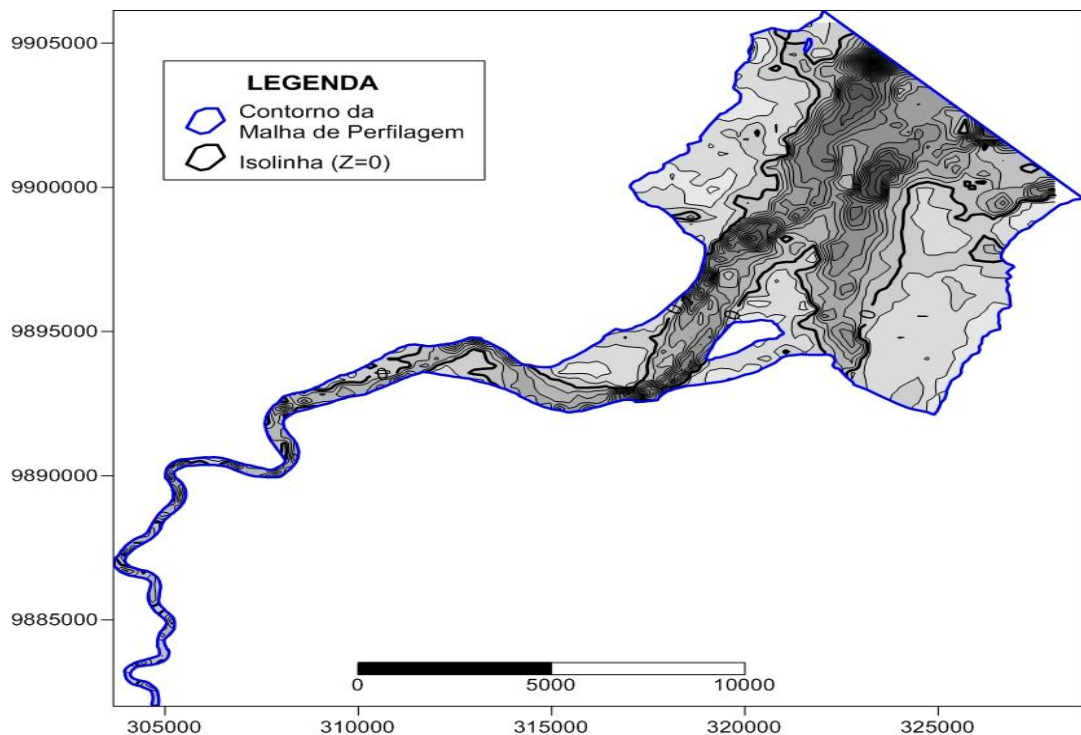


FIGURA 38 – Mapa de contorno gerado através do interpolador Krigagem, aplicando resolução de 5 metros. Escala em metros.

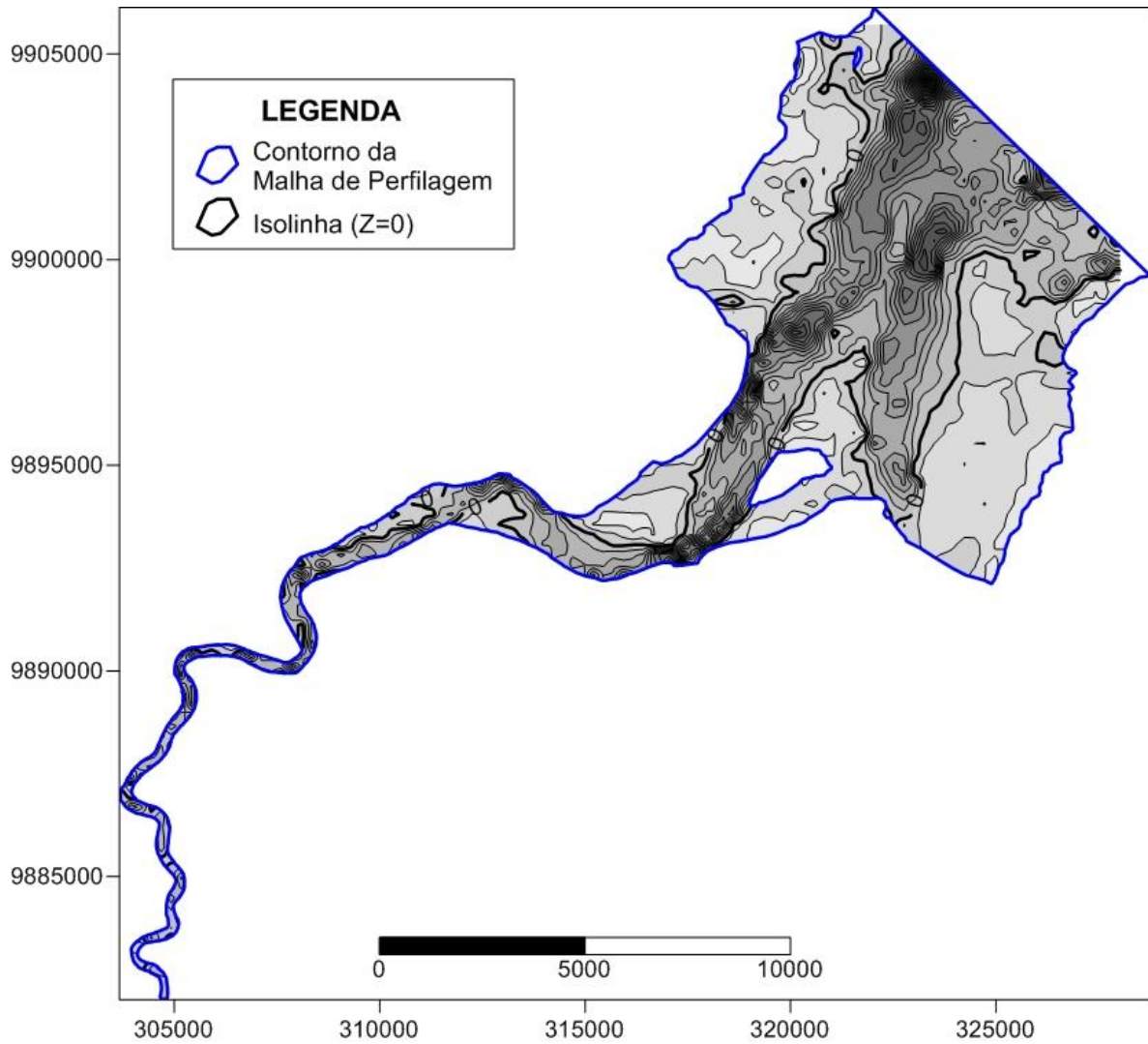


FIGURA 39 – Mapa de contorno gerado através do interpolador “Mínima curvatura”, com resolução de 5 metros. Escala em metros.

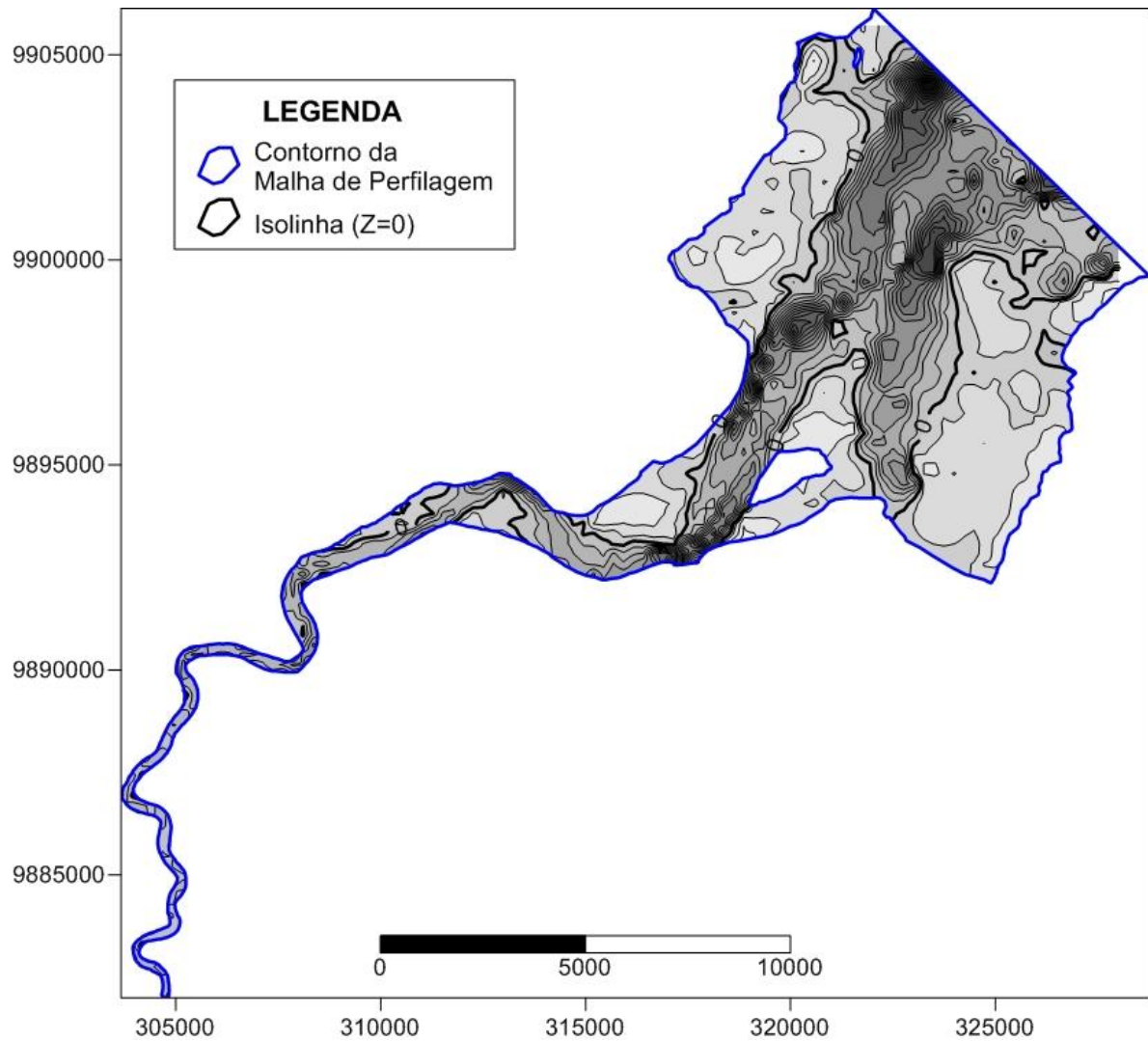


FIGURA 40 - Mapa de contorno gerado através do interpolador “Vizinho mais próximo”, com resolução de 5 metros. Escala em metros.

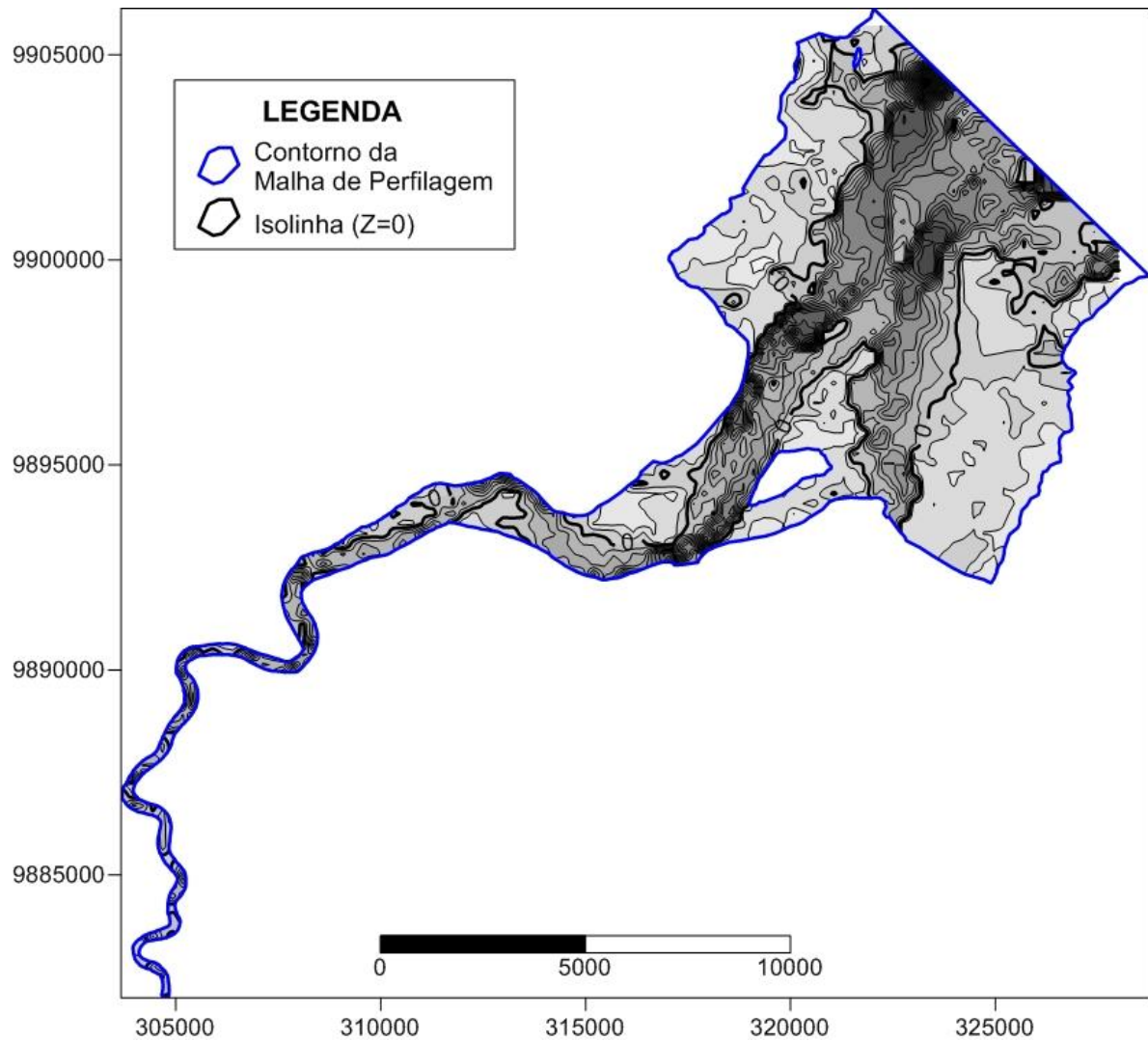
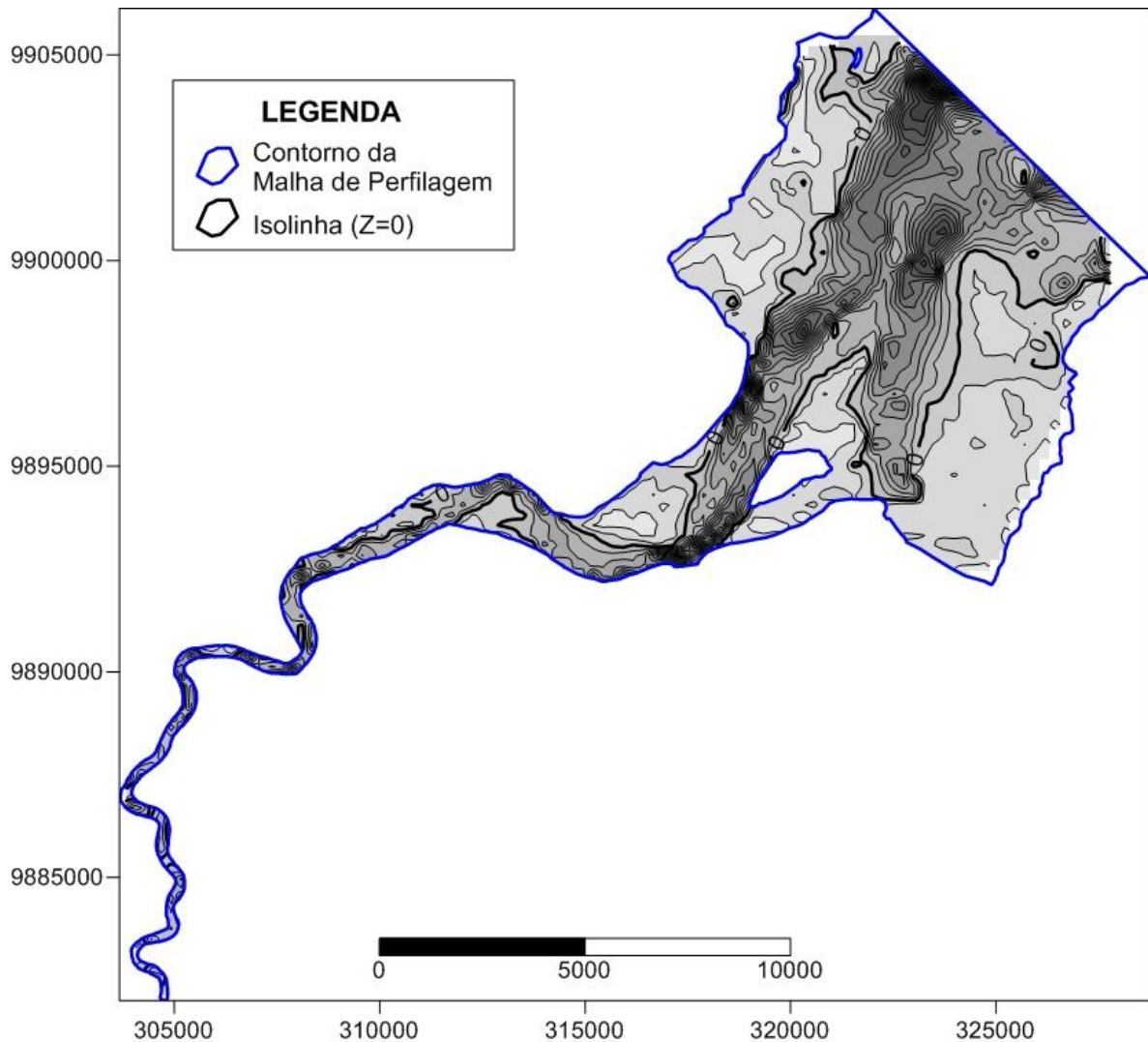
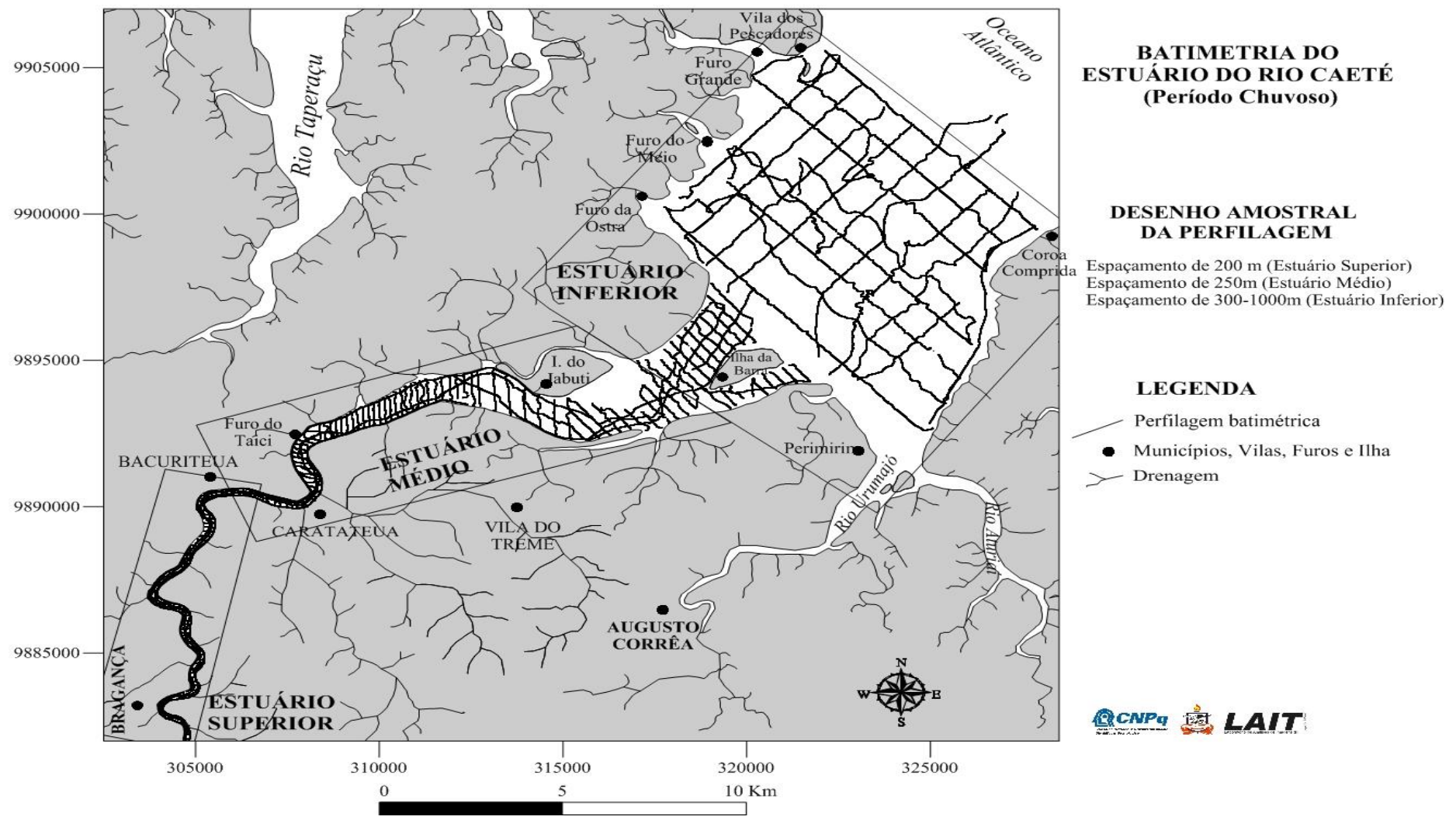


FIGURA 41 - Mapa de contorno gerado através do interpolador “Triangulação com interpolação linear”, com resolução de 5 metros. Escala em metros.



Baseado nos valores mínimos e máximos de Z (profundidade) e na visualização dos mapas gerados, escolheu-se o método da Krigagem, como interpolador ideal para geração do mapa final da área. Como o espaçamento utilizado na batimetria foi diferente ao longo do estuário, fez-se necessário dividir em setores o estuário estudado (figura 42), a fim de se obter um resultado mais conciso, após a interpolação.

FIGURA 42 – Setorização do estuário, obedecendo ao espaçamento da perfilagem.



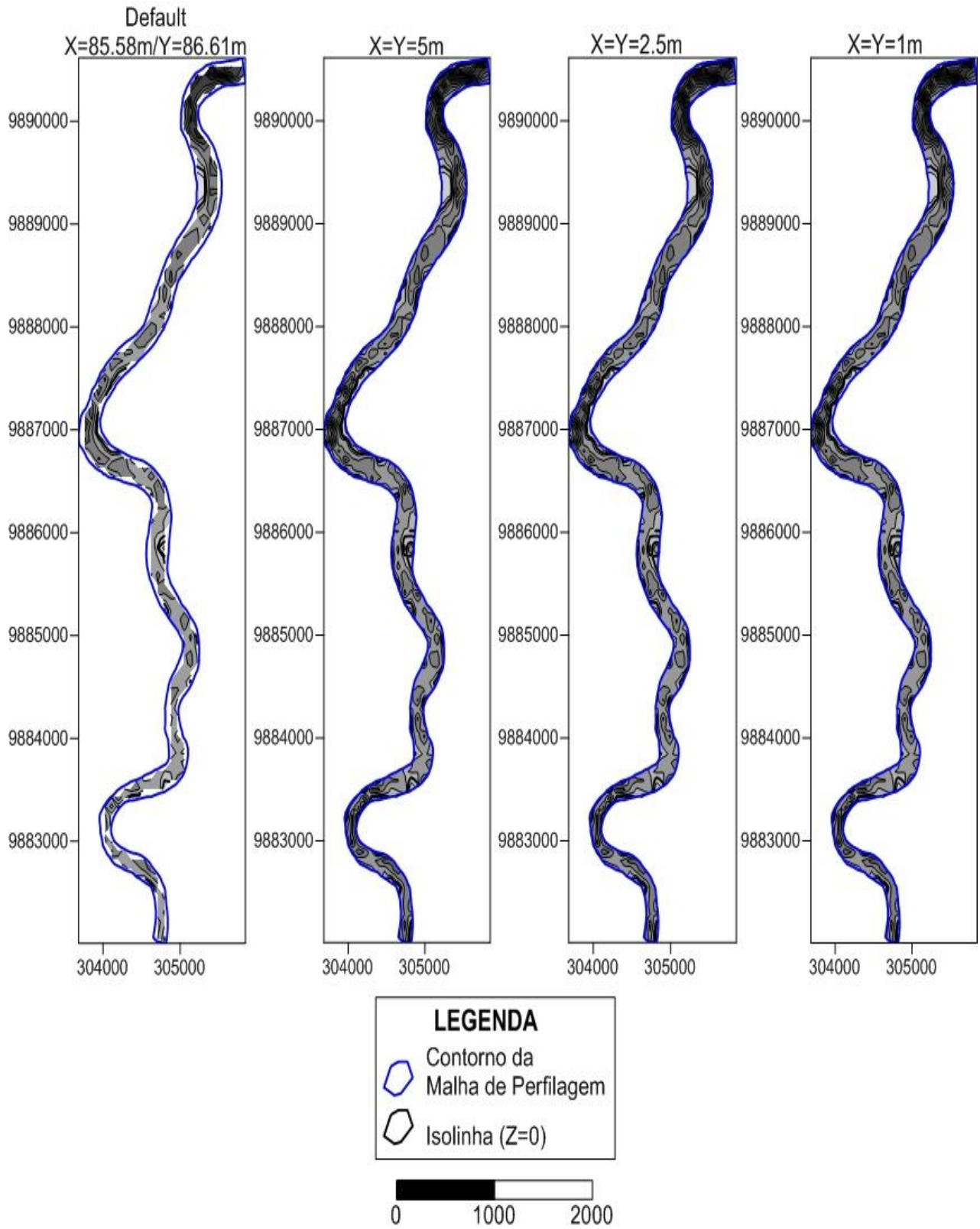
Para o setor definido como estuário superior (figura 42), os seguintes valores de Z foram obtidos (tabela 9), para diferentes resoluções:

TABELA 9 – Resultados estatísticos para o estuário superior.

RESULTADOS ESTATÍSTICOS - ESTUÁRIO SUPERIOR - PROFUNDIDADE (Z) – metros (m)		
Valores originais	Min	-10.09
	Max	2.54
DEFAULT X=85.58m/Y=86.61m	Min	-6.07
	Max	1.05
X=Y=5m	Min	-7.09
	Max	2.08
X=Y=2.5m	Min	-7.15
	Max	2.08
X=Y=1m	Min	-7.20
	Max	2.08

Percebe-se, que a resolução de 1 metro foi a mais indicada para elaboração do mapa de contorno, devido aos valores obtidos terem sido mais fieis aos dados coletados em campo. As resoluções de 5 m, 2,5 m e 1 m (figura 43) demonstraram poucas diferenças entre si. Desta maneira o critério de seleção da resolução mais adequada foram os valores de Z obtidos após as interpolações (tabela 9).

FIGURA 43 – Diferentes resoluções aplicadas usando a Krigagem, para o estuário superior. Escala em metros.



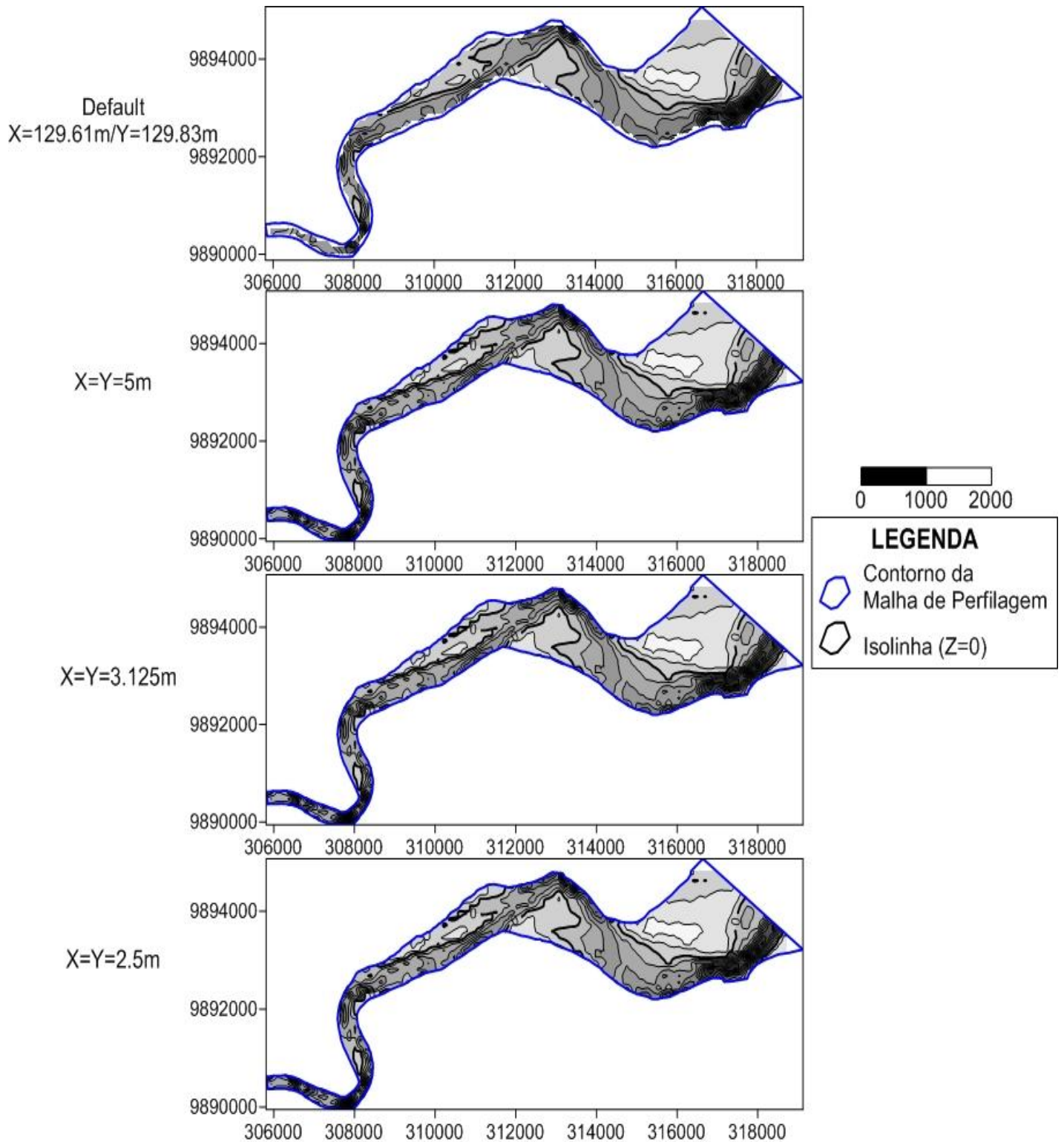
Para a área do estuário médio, os seguintes valores de Z foram obtidos (Tabela 10):

TABELA 10 - Resultados estatísticos para o estuário médio.

RESULTADOS ESTATÍSTICOS – ESTUÁRIO MÉDIO - PROFUNDIDADE (Z) – metros (m)		
Valores Originais	Min	-16.15
	Max	3.4
DEFAULT X=129.61m/Y=129.83m	Min	-8.91
	Max	2.32
X=Y=5m	Min	-10.51
	Max	2.46
X=Y=3.125m	Min	-10.57
	Max	2.46
X=Y=2.5m	Min	-10.55
	Max	2.47

Para este setor do estuário, a resolução mais fiel aos dados originais foi a de 3.125 m, devido à sua maior aproximação, em comparação às outras resoluções testadas. Visualmente também não houveram muitas diferenças entre as resoluções testadas, excluindo a *default* (figura 44).

FIGURA 44 - Diferentes resoluções aplicadas usando a Krigagem, para o estuário médio. Escala em metros.



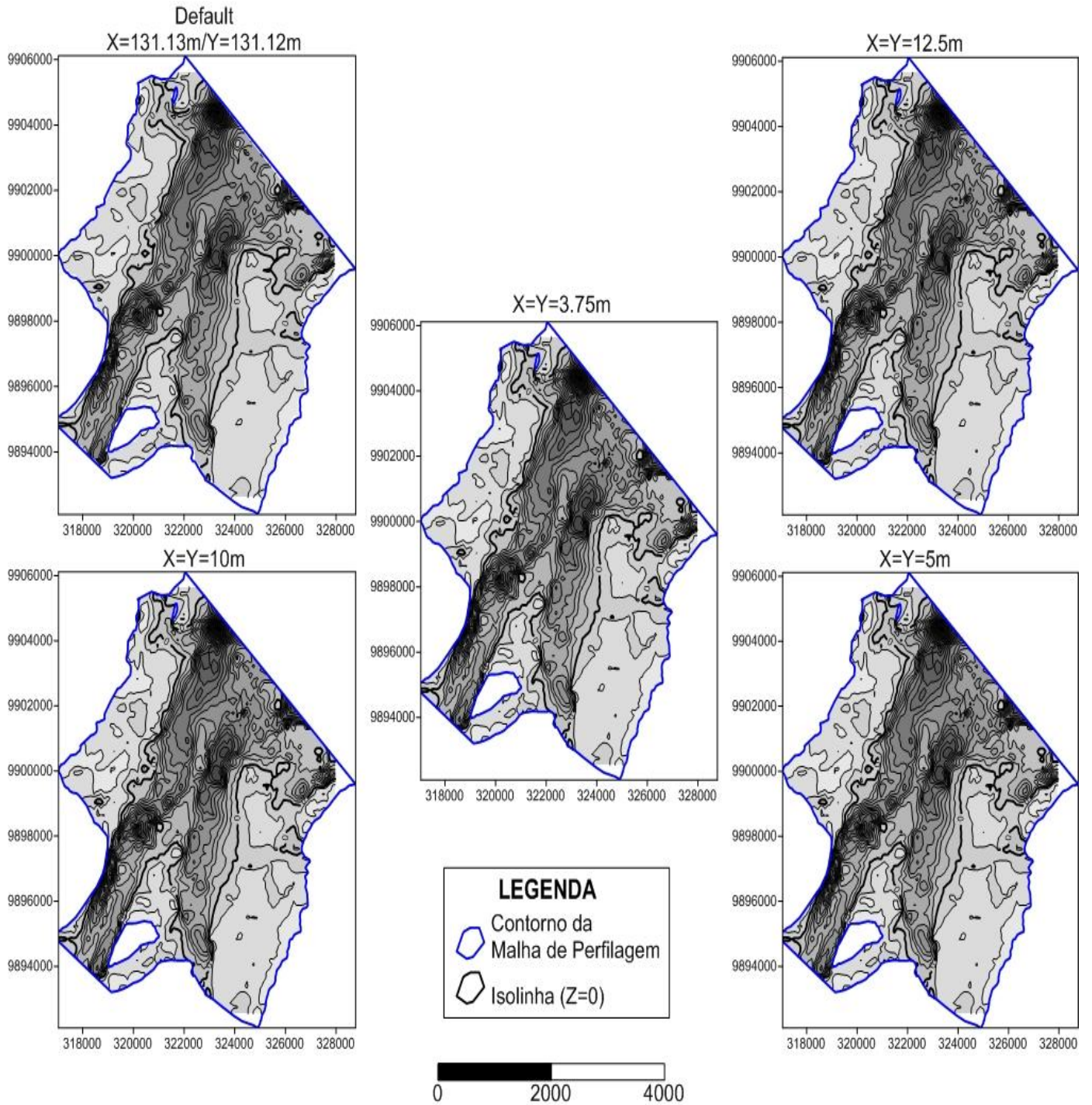
Para a área do estuário inferior, os valores de Z obtidos foram os seguintes, conforme observado na tabela abaixo (tabela 11):

TABELA 11 – Resultados estatísticos para o estuário inferior

RESULTADOS ESTATÍSTICOS – ESTUÁRIO INFERIOR		
- PROFUNDIDADE (Z) – metros (m)		
VALORES ORIGINAIS	Min	-17.31
	Max	3.78
DEFAULT X=131.13m/131.12m	Min	-16.22
	Max	3.04
X=Y=12.5m	Min	-16.26
	Max	3.10
X=Y=10m	Min	-16.27
	Max	3.11
X=Y=5m	Min	-16.29
	Max	3.11
X=Y=3.75m	Min	-16.29
	Max	3.11

Para este setor do estuário, a resolução mais fiel aos dados originais foi a de 5 m, em comparação às outras resoluções testadas. Assim como os outros setores do estuário, visualmente também não houve muitas diferenças entre as resoluções testadas (figura 45).

FIGURA 45 - Diferentes resoluções aplicadas usando a Krigagem, para o estuário inferior. Escala em metros.



7 DISCUSSÃO

7.1 MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO

A eficiência de cada um dos métodos de interpolação está relacionada à sua qualidade de representação. Assim como toda interpolação traduz uma incerteza no ponto estimado, é importante, portanto, saber qual interpolador induz ao menor erro. Nesse sentido, a seleção da técnica de interpolação é fundamental para a geração do modelo (FERNANDES; MENEZES, 2005).

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

Em face da grande variabilidade de opções de modelagem (tipo de grade e interpoladores), foram testados métodos diferentes de interpolação, oferecidos pelo programa Surfer 9, para se verificar qual método produz melhor resultado para a área em estudo. Através dos resultados, verificaram-se muitas diferenças entre os interpoladores utilizados, principalmente usando a resolução *default*, ou seja, a resolução oferecida pelo programa.

O tipo de malha amostral obtida – agrupada e irregular – afetou diretamente no resultado final. Isto porque cada método se comporta de maneira diferente, de acordo com o delineamento da malha.

O interpolador inverso da distância, apresentou resultados satisfatórios, próximos aos da Krigagem. Porém, para a amostra de dados agrupados, este método não é adequado, sendo que muitos dados esparsos foram gerados em razão disto.

O resultado obtido através do interpolador curvatura mínima condiz com o observado no trabalho de Medina e Medina (2007), referente à suavização de contornos que o método produz no mapa gerado. Além desta suavização, os autores observaram e tal resultado também é citado por Landim (2000), que este método tende a produzir curvas principalmente nas bordas, lugar onde geralmente não existem dados amostrados.

Os valores obtidos através do interpolador Shepard modificado foram muito além dos dados originais, criando resultados sem sentido, fato este também observado por Mazzini e Schettini (2009), em seu trabalho.

O resultado apresentado pelo método vizinho natural atesta a afirmação de Mazzini e Schettini (2009), relacionado à tendência de não-extrapolação de valores por parte do método. A ausência de linhas de contorno dentro da malha de amostragem talvez possa ser explicada

pelo fato deste método se utilizar de polígonos de Thiessen para obter o resultado final da interpolação.

A geração de linhas de contorno com um padrão serrilhado, apresentado pelo método vizinho mais próximo também foi notada no trabalho de Botelho et. al. (2005). Em seu trabalho, o autor comparou este método com o método do inverso da distância, e não houve suavização da imagem gerada, apresentado padrões semelhantes aos obtidos neste trabalho. Este método, segundo Franke (1982), consiste basicamente em atribuir ao valor interpolado, o mesmo valor de um dos dados originais, ou seja, não gera novos valores. Isto explica o motivo do mapa gerado não ter extrapolado valores que não condizem com os dados originais.

O mapa obtido através do interpolador regressão polinomial não refletiu o resultado esperado para caracterização da área de estudo. Os padrões de linhas paralelas resultantes não demonstram o desenho do estuário, e isto é justificado pelo fato deste método não ser exatamente um método de interpolação, segundo Mazzini e Schettini (2009), pois o mesmo não tenta prever valores da variável Z, além de gerar artefatos nas bordas e no interior do mapa.

O interpolador “função da base radial” também não demonstrou o resultado esperado, pois os valores finais obtidos foram muito além dos dados originais. Porém, Jacob e Young (2006), comparando este método com o método inverso da distância, que é outro interpolador exato, afirmam que as funções de base radial podem realizar predição de valores acima do valor máximo observado ou abaixo do valor mínimo observado, ao contrário do inverso da distância, que não foge arbitrariamente dos dados originais.

O resultado obtido através do método “triangulação com interpolação linear” é justificado pela maneira como o interpolador se comporta, que é de criar triângulos através de linhas que interligam pontos. Desta maneira, os padrões “serrilhados” observados e linhas de contorno triangulares discretas, presentes no mapa gerado, são justificados por este motivo. A pequena extrapolação dos dados, presente na malha gerada, é justificada pelo fato de ser um interpolador exato, de acordo com Liotte, Macedo e Ferreira (2000).

Os resultados obtidos através dos métodos média móvel, dados métricos e polinômio local mostraram ser totalmente irrelevantes para a análise dos dados, em função dos valores obtidos estarem longe da realidade.

Entre os 12 métodos avaliados, concluiu-se enfim que a Krigagem é o método mais adequado para representar a área de estudo, baseado nos valores obtidos após a interpolação, que foram aproximados dos coletados em campo, e pelo aspecto visual do mapa gerado (figura 46), que conseguiu caracterizar de maneira mais aproximada que os outros métodos. O

método da Krigagem, conforme Landim (2000) especifica, é adequado para dados espaçados irregularmente, portanto se adequou bem à amostra batimétrica.

Entretanto, notou-se que ao dividir o estuário em setores, visualmente não houveram muitas mudanças entre as resoluções testadas, apresentando apenas diferenças sutis, visualmente e nos valores interpolados de cada resolução.

Diversos trabalhos apontam a Krigagem como sendo um interpolador apropriado, pois cria uma forma de relevo mais uniforme.

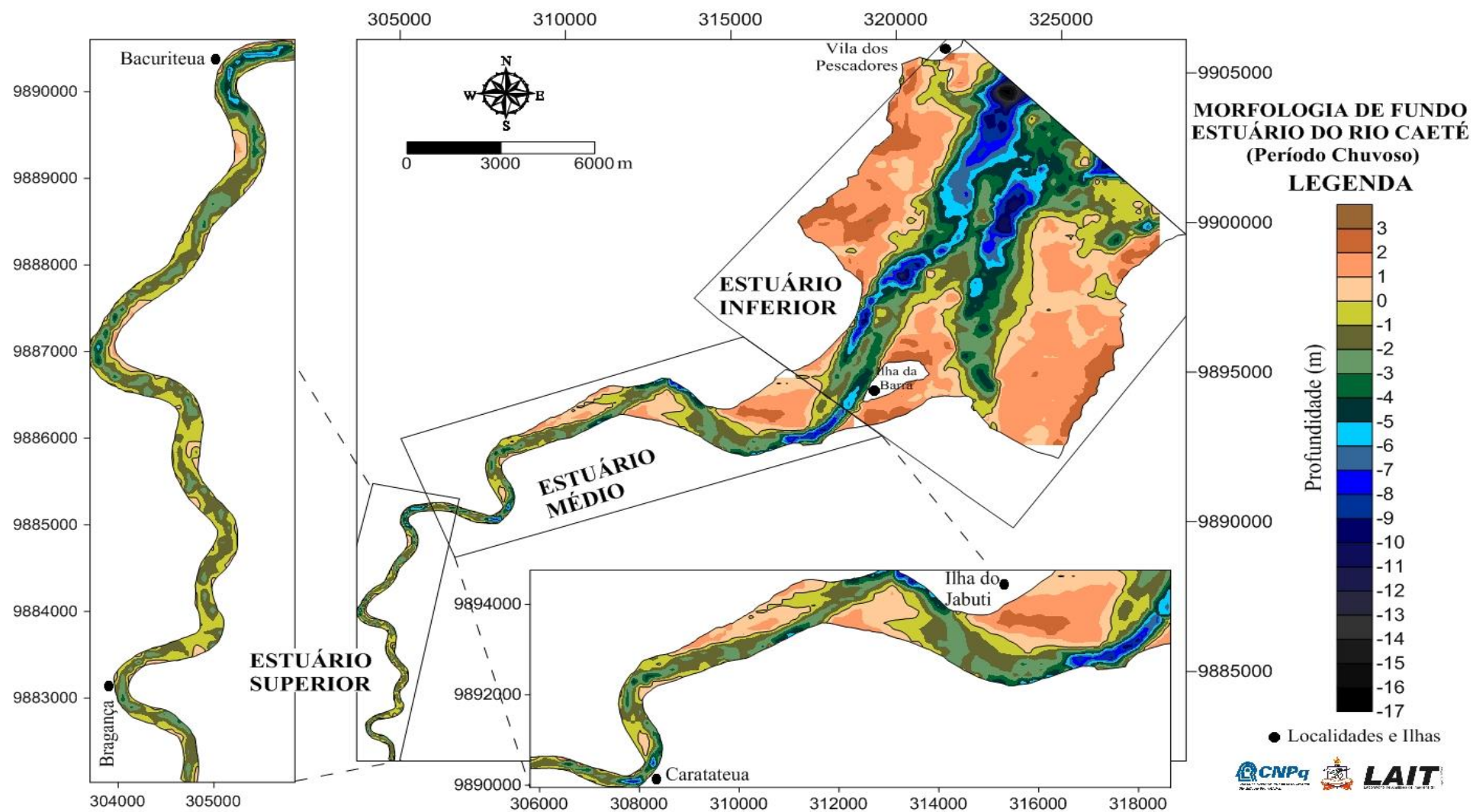
7.2 MORFOLOGIA

Através do mapa final (figura 46), e principalmente após a setorização da área, pôde-se observar com mais clareza os aspectos morfológicos do estuário. O estuário em questão apresenta uma configuração semelhante à apresentada por Woodroffe (1986), referente ao rio Alligator, na Austrália:

- Uma configuração de funil estuarino, que neste caso representa a foz do estuário, em que há um alargamento brusco em direção ao mar. Devido à configuração de funil, a entrada da maré enchente vai sendo comprimida em uma área menor do estuário, contribuindo desta maneira para que a velocidade das correntes de maré cresçam dentro do estuário. Neste trecho, ocorrem a presença de barras arenosas e ilhas de manguezais;

- Segmento retilíneo – meandrante – retilíneo. O segmento retilíneo é dominado pelas correntes de maré. Barras arenosas também são encontradas neste setor. No segmento meandrante, a parte côncava dos meandros tendem a ter margens erosivas enquanto que na parte convexa ocorre deposição de sedimentos, formando depósitos de barra em pontal. Barras arenosas longitudinais também estão presentes no estuário, sendo típicas de um estuário dominado por maré.

Figura 46 – Mapa final, gerado pela Krigagem. A morfologia do estuário pode ser observada, para cada setor do estuário.



8 CONCLUSÃO

Após a análise dos dados, pode-se concluir que os processos de interpolação auxiliam bastante na visualização dos dados e permitem a caracterização da área de estudo.

Entre os interpoladores utilizados, a Krigagem demonstrou resultados mais satisfatórios, fato relacionado com a maneira em que o método empregado atribui pesos diferenciados às amostras.

Mas deve-se lembrar também que as interpolações necessitam de um grande número de dados observados para resultar em uma maior precisão, no mínimo 100, mas o ideal é mais de 1000, dependendo da área de estudo.

Por fim, espera-se também que este trabalho possa contribuir para um maior número de trabalhos relacionando os métodos de interpolação com o estudo dos ambientes oceanográficos.

REFERÊNCIAS

BAAR, R.; CORDEIRO, M.R.; DENICH, M.; FÖLSTER, H. Floristic inventory of secondary vegetation in agricultural systems of East-Amazonia. **Biodiversity and Conservation**, Amsterdã, v.13, p.501-528, 2004.

BARBOSA, R.L. **Geração de Modelo Digital do Terreno por aproximações sucessivas utilizando câmaras digitais de pequeno formato**. Dissertação (Mestrado) - UNESP-PP, 1999.

BOTELHO, M. F.; SILVA, C. R.; SCHOENINGER, E. R.; CENTENO, J. A. S. Comparação dos resultados de interpoladores “Vizinho mais próximo” e “Inverso de uma distância” no cálculo de volume a partir de dados do laser scanner. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. **Anais...** Goiânia: INPE, 2005. p. 731-736. Disponível na biblioteca digital URLib: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.19.20.47/doc/731.pdf>>. Acesso em: 20 Jul. 2011.

BRESNAHAN, T., DICKENSON, K. **Surfer 9 Training Guide Golden Software**, Inc. Disponível em: <<http://www.goldensoftware.com/Surfer9TrainingGuide.pdf>> Acesso em: 20 maio 2011.

BURROUGH, P. A. **Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment**. Oxford University Press, Oxford, 194 p., 1986.

CAVALCANTE, H.C.S. **Processos oceanográficos na região costeira do Caeté**. 138f. Dissertação (Doutorado em Geoquímica ambiental) – Universidade Federal Fluminense. 2007. Disponível em: <http://www.bdt.d.ndc.uff.br/tde_arquivos/8/TDE-2011-05-02T080346Z-2892/Publico/Microsoft%20Word%20-%20Tese_Georgenes_versao_Completal.pdf> acessado em 20/07/2011

COSTA, J.B.S.; BORGES, M.S.; BEMERGUY, R.L.; FERNANDES, J.M.G.; COSTA Jr., P.S. & COSTA, M.L. Evolução cenozóica da Região de Salinópolis, Nordeste do Estado do Pará. *Geociências*, 12(2): 353-372. 1993.

CRESSIE, N. **Statistics for Spatial Data**. New York: John Wiley & Sons, 900 p. 1991.

DALRYMPLE, R.W.; Zaitlin, B.A. **Tidal sedimentation in the macrotidal Cobequid Bay-Salmon River estuary, Bay of Fundy**. Second international Symposium on Clastic Tidal Deposits, Canadian Society of Petroleum Geologists, Field Guide, 84 p. 1989.

DALRYMPLE, R.W.; KNIGHT, R.J.; ZAITLIN, B.A.; MIDDLETON, G.V. **Dynamics and facies model of a macrotidal sand-bar complex, Cobequid Bay-Salmon River estuary (Bay of Fundy)**. *Sedimentology*, 37: 577-612. 1990.

DALRYMPLE, R. W., ZAITLIN, B. A., AND BOYD, R. **Estuarine facies models-- Conceptual basis and stratigraphic implications.** Journal of Sedimentary Petrology, v. 62, p. 1,130-1,146.1992.

DINIZ, T.D.A.S. Climatic characteristics of Eastern Amazon region Pp. 3-13. In: **Studies on the utilisation and conservation of soil in Eastern Amazon region.** Eschborn, Embrapa-Cpatu, GTZ. 1991.

FERNANDES, M.C.; MENDEZES, P.M. Comparação entre métodos para geração de MDE para a obtenção de observações em superfície real no maciço da Tijuca-RJ. RBC - **Revista Brasileira de Cartografia.**v. 57, n. 2, p. 154-161, 2005.

FERREIRA, M.S.G.; OLIVEIRA, L. **Potencial produtivo e implicações para o manejo de capoeiras em áreas de agricultura tradicional no Nordeste Paraense.** Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2001. 6p. (Comunicado Técnico, n. 56).

FRANKE, R. **Scattered Data Interpolation: Test of Some Methods,** Mathematics of Computations, v. 33, n. 157, p. 181-200. 1982.

FRANZINELLI, E. 1982. Contribuição a geologia da costa do Estado do Pará (entre as baías de Curuçá e Maiaú). In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE QUATERNÁRIO, 4,1982, Manaus. **Atas...Manaus, INQUA.** 305-322.

FRANZINELLI, E. 1992. Evolution of the geomorphology of the coast of the State of Pará, Brazil. In: PROST, M.T.(edits) **Évolution des littoraux de Guyane et de la Zone Caraïbe Méridionale pendant le Quaternaire.** Paris, ORSTOM. 203-230.

FRAZÃO, EUGENIO PIRES. **Caracterização hidrodinâmica e morfosedimentar do estuário potengi e áreas adjacentes: subsídios para controle e recuperação ambiental no caso de derrames de hidrocarboneto.** Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Ciências exatas e da Terra. (Tese de Mestrado). 2003.

GALLO, M.N. **A INFLUÊNCIA DA VAZÃO FLUVIAL SOBRE A PROPAGAÇÃO DA MARÉ NO ESTUÁRIO DO RIO AMAZONAS .** Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Oceânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2004.

GORAYEB, A. **Análise Integrada da paisagem na Bacia Hidrográfica do Rio Caeté– Amazônia Oriental.** Tese de Doutorado, 203 p., Universidade Estadual Paulista, SP, Brasil. 2008.

IESCHECK , A.L **.Dados espaciais e interpolação qualitativa: algumas questões.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 200-.

IGREJA, H.L.S. 1991. **Aspectos tectono-sedimentares do Fanerozóico do nordeste do Pará e noroeste do Maranhão, Brasil.** Belém, UFPA. Tese de Doutorado. 191 p. 1991.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Manual técnico de uso da terra**. Manuais técnicos em Geociências, Rio de Janeiro. 2006. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acessado em 01/05/2011.

JAKOB, A. A. E. ; YOUNG, A. F. O uso de métodos de interpolação espacial de dados nas análises sociodemográficas. XV Encontro Nacional de Estudos Populacionais. Brasil. 2006

LANDIM, P.M.B. **Análise estatística de dados geológicos**. Editora UNESP, São Paulo,. 226 p. 1998.

LANDIM, P.M.B. **Introdução aos métodos de estimação espacial para confecção de mapas**. 20 p. Rio Claro: UNESP. 2000.

LANDIM, P. M. B.; MARTEIRO, R.; CORSI, A. C. **Introdução à confecção de mapas pelo software SURFER**. Geomática. Texto didático 8. DGA. Rio Claro: IGCE/UNESP. 20 p .2002.

LANDIM, P.M.B. & CORSI, A.C. **Cálculo de superfícies de tendência, por regressão polinomial, pelo SURFER 6**. DGA,IGCE,UNESP/Rio Claro, Lab. Geomatemática,Texto Didático 05, 11 pp. 2001. Disponível em <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html>>. Acesso em: 20/05/2011

LIOTTE, S. V.; MACEDO, A. B.; PEDRO, M. F. **Utilização de Técnicas de Geoprocessamento para apoio ao planejamento físico-territorial do município de Pariquera-Açu/SP**. Dissertação de Mestrado em Geociências - Universidade de São Paulo. 2000.

MÁCOLA, G.; EL-ROBRINI, M. **Ilha dos Guarás (Mariteua) – município de Curuçá (NE do Pará): aspectos físicos, meteorológicos e oceanográficos**. Cartografia, Hidrografia e Digitalização – CHD & Grupo de Estudos Marinhos e Costeiros – GEMC. COMPANHIA DOCAS DO PARÁ – CDP. 2004. (Relatório Final.).

MAZZINI, P.L.F.; SCHETTINI, C.A.F. **Avaliação de metodologias de interpolação espacial aplicadas a dados hidrográficos costeiros quase-sinóticos**. Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology, 13: 53-64. 2009

MEDINA, A.S ; MEDINA, S.S.S. **A representação da superfície topográfica através de modelos digitais de terreno**. Paraná. Disponível em: <www.degraf.ufpr.br/artigos_graphica>. Acesso em 20/07/2011.

MIRANDA, L. B.; CASTRO, B.M.; KJERFVE, B.. **Princípios de Oceanografia Física de Estuários**. São Paulo, edusp, 414p. 2002.

OLIVEIRA, M.S. **Planos amostrais para variáveis espaciais utilizando geoestatística**. Dissertação (Tese de Mestrado) - Instituto de Matemática, Estatística e Ciência da Computação, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas. 100p. 1991.

PRITCHARD, D. W. (1967) What is an estuary, physical viewpoint. In: G. H. Lauf (editor): **Estuaries**. American Association for the Advancement of Science, Washington D.C., publ.no.83. Disponível em: <<http://coastal.tamug.edu/classes/alaskaclass/Pritchard%20Def%20of%20estuary.pdf>>. Acesso em 01/06/2011.

ROCHA, M. A. B. **Sistema de informações geográficas aplicado à gestão da bacia do Caeté – nordeste paraense**. 136p. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2009.

SOUZA FILHO; EL-ROBRINI, M. **Morfologia, processos de sedimentação e litofácies dos ambientes morfo-sedimentares da planície costeira bragantina, nordeste do Pará, Brasil**. Geonomos, 4, n. 2, p. 1-16. 2005

YANG, C. S., et.al. **Twelve different interpolation methods: A case study of Surfer 8.0**. 2004. Disponível em: <http://www.cartesia.org/geodoc/isprs2004/comm2/papers/231.pdf>. Acesso em 10/05/2011.

WEIRICH NETO, P. H. et al. **Um estudo da variabilidade espacial do conteúdo de areia do solo, utilizando diferentes métodos de interpolação**. Ciências Agrárias e Engenharias, v.12, n.1, p41-49, 2006.

WOODROFFE, C.D.; CHAPPELL, J.; THOM, B.G.; WALLENSKY, E. 1986. **Geomorphological Dynamics and Evolution of the South Alligator River and Plains, Northern Territory**. Australia National University. North Australia Research Unit. Mangrove Monograph nº 3. 190p.

WOODROFFE, C.D.; CHAPPELL, J.; THOM, B.G.; WALLENSKY, E. 1989. **Depositional models of a macrotidal estuary and flood plain, South Alligator River, Northern Australia**. Sedimentology, 36(5): 737-756.