



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

CENTRO DE TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Pedro Henrique Pinto Campos

**ANÁLISE ESTATÍSTICA DE MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO
ESPACIAL E TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO USANDO
IMAGEM DE SATÉLITE NA CARACTERIZAÇÃO BATIMÉTRICA DA
BACIA POTIGUAR**

**Natal
2018**

Pedro Henrique Pinto Campos

**ANÁLISE ESTATÍSTICA DE MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO
ESPACIAL E TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO USANDO
IMAGEM DE SATÉLITE NA CARACTERIZAÇÃO BATIMÉTRICA DA
BACIA POTIGUAR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Venerando Eustáquio Amaro

Co-orientadora: Prof^a. Dra. Ada Cristina Scudelari

Natal - RN

2018

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Campos, Pedro Henrique Pinto.

Análise estatística de métodos de interpolação espacial e técnicas de sensoriamento remoto usando imagem de satélite na caracterização batimétrica da Bacia Potiguar / Pedro Henrique Pinto Campos. - 2018.

85 f.: il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Natal, RN, 2018.

Orientador: Prof. Dr. Venerando Eustáquio Amaro.

Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Ada Cristina Scudelari.

1. Geoprocessamento - Dissertação. 2. LANDSAT - Dissertação. 3. Processamento digital de imagens - Dissertação. 4. MDT - Dissertação. I. Amaro, Venerando Eustáquio. II. Scudelari, Ada Cristina. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 550.8

PEDRO HENRIQUE PINTO CAMPOS

**ANÁLISE ESTATÍSTICA DE MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO
ESPACIAL E TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO USANDO
IMAGEM DE SATÉLITE NA CARACTERIZAÇÃO BATIMÉTRICA DA
BACIA POTIGUAR**

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-graduação, em Engenharia Civil, da
Universidade Federal do Rio Grande do Norte,
como requisito à obtenção do título de Mestre em
Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Venerando Eustáquio Amaro – Orientador

Prof. Dr. Michael Vandesteem Silva Souto – Examinador Externo (Universidade
Federal do Ceará)

Prof^a. Maria de Fátima Alves de Matos – Examinador Interno

Natal, 20 de abril de 2018.

ANÁLISE ESTATÍSTICA DE MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO ESPACIAL E TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO USANDO IMAGEM DE SATÉLITE NA CARACTERIZAÇÃO BATIMÉTRICA DA BACIA POTIGUAR

Pedro Henrique Pinto Campos

Orientador: Prof. Dr. Venerando Eustáquio Amaro

Co-orientadora: Prof.^a. Dra. Ada Cristina Scudelari

RESUMO

O Brasil tem um dos maiores litorais do mundo com mais de 8.500 km de extensão, muitas de suas cidades foram instaladas no litoral e estão sujeitas às consequências de problemas associados a uma ocupação não planejada: erosão costeira, desordenamento urbano, impacto paisagístico, ecológicos e etc. Isso torna necessário um estudo cada vez mais aprofundado do entendimento da morfologia e de modelos de mapeamento da plataforma continental, além disso existe no processo a geração de mapas batimétricos por meio de interpolação a partir de nuvens de pontos, assim outro estudo necessário é o entendimento de modelos matemáticos usados nessas interpolações. A imagem de satélite de uma ampla captação eletromagnética, por meio de algumas metodologias de cálculos específicos, pode mostrar, por exemplo, a batimetria rasa da plataforma continental. A literatura mostra que ainda não se sabe qual metodologia de cálculo é a mais adequada. Existem diversos métodos de interpolação hoje, mas ainda muito se discute sobre quais são os mais apropriados para cada caso. O mapeamento do leito marinho é importante para diversas finalidades. Pode ser usado para navegação, prospecção de reservatórios de petróleo, monitoramento ambiental, modelagem de ondas, estudo de erosão costeira,

atualização de carta náutica e outros. Moura (2010) fez a análise de interpoladores usando dados de batimetria obtidos por Cartas Náuticas e dados de batimetria obtidos *in loco*. Em seu trabalho foram avaliados uma série de 12 interpoladores. Uma imagem de satélite processada por Gomes *et al.* (2007) foi usada para auxiliar numa avaliação visual dos resultados. O presente trabalho tem como objetivo geral fornecer uma referência quantitativa proveniente de uma extração de batimetria de uma imagem de satélite Landsat 8 OLI/TIRS da plataforma continental do estado do Rio Grande do Norte para fazer uma análise estatística dos interpoladores usados em dados levantados *in loco*. Os métodos de extração de batimetria usados foram Mcfeeters (1996) e Philpot (1989). A extração de batimetria foi feita com os *softwares* ArcGIS, Envi e Matlab. As interpolações foram feitas no Surfer e os dados foram comparados entre si usando as análises estatísticas de coeficiente de correlação (R^2), índice de concordância (d), MAPE, RMSE e validação cruzada. Em relação à extração de batimetria, o Mcfeeters (1996) foi o método que trouxe uma melhor representação da região. Já em termos de resultado das interpolações dos dados de batimetria *in loco* os interpoladores polinômio local, inverso da distância, mínima curvatura foram estatisticamente geraram modelos mais representativos do local. Para os dados de carta náutica, os interpoladores Vizinho Natural, Triangulação por Interpolação Linear, Krigagem e Função Base Radial foram comprovados estatisticamente como os mais apropriados por terem apresentado os menores erros. Ao final chegou-se a conclusão de que a extração de batimetria por imagem de satélite pode sim complementar a análises dos interpoladores usados nos dados de batimetria de carta náutica e Petrobras/UFRN.

Palavras-chave: Processamento digital de imagens; Landsat; geoprocessamento, MDT.

STATISTICAL ANALYSIS OF SPACE INTERPOLATION METHODS AND REMOTE SENSING TECHNIQUES USING SATELLITE IMAGERY IN THE BATHYMETRIC CHARACTERIZATION OF THE POTIGUAS BASIN

Pedro Henrique Pinto Campos

Adviser: Prof. Dr. Venerando Eustáquio Amaro

Co-adviser: Prof.^a. Dr^a. Ada Cristina Scudelari

ABSTRACT

The extraction of bathymetry by satellite image is an activity that has been evolving in its methodology due to the aerospace technological advances. Satellite images of a wide electromagnetic capture are able to bring information that are beyond traditional photographs. They are images that, through some specific calculations methodologies can show, for example, the depth of the ocean. The literature shows that it is not yet known which calculation methodology is most appropriate. Another key point involved in the process is the generation of bathymetric maps by interpolation from clouds of points, there are several methods of interpolation today, but much is still debated about which are the most appropriate for each case. The mapping of the seabed is an activity performed for several purposes. It can be used for navigation, oil reservoir prospecting, environmental monitoring, wave modeling, coastal erosion study and others. Brazil has one of the largest coastlines in the world with more than 8500 km of extension, many of its cities have been installed on the coast and are submitted to the consequences of problems associated with the sea, coastal erosion, urban disorder, landscape impact, ecological impact etc. This necessitates a deeper study of ocean floor mapping models. Moura (2010) did the interpolation analysis using bathymetry data obtained by

Nautical Charts and bathymetry data obtained in loco. In his work a series of 12 interpolators were evaluated. A satellite image of Gomes *et al.* (2007) was used to aid in a visual evaluation of the results. The present work has as general objective to complement the analysis of Moura (2010), providing a quantitative reference to make this evaluation, from a bathymetry extraction of a Landsat 8 Satellite Image of the region. The methods of bathymetry extraction used were Mcfeeters (1996) and Philpot (1989). The extraction of bathymetry was done with the software Arcgis, Envi and Matlab. The interpolations were made in the Surfer and the data were compared to each other using the statistical analysis of Correlation Coefficient (R^2), concordance index (d), MAPE, RMSE and Cross Validation. In terms of the results of the bathymetry extraction, Mcfeeters (1996) was the method that brought better representation of the region. In terms of result of the interpolations of the in-situ bathymetry data, the Interpolators Local Polynomial, Inverse Distance, Minimum Curvature were chosen the most representative methods. For nautical chart data, the Natural Neighbor, Triangulation with Linear Interpolation, Kriging, and Radial Base Function interpolators were classified as the most appropriated interpolation methods because they had the best statistic results.

Key-words: Digital image processing; Landsat; geoprocessing, Digital Terrain Model.

Dedico este trabalho a dois grandes amigos: meus pais.

AGRADECIMENTOS

A CAPES pela bolsa concedida para a viabilidade da pesquisa.

Ao meu orientador Professor Venerando Amaro pela confiança que teve em mim e pela oportunidade de me envolver com uma temática tão importante para sociedade.

À minha Co-orientadora Professora Ada Sudelari, força nos momentos de dificuldade e também pela orientação acadêmica.

Aos Professores, Fagner França, Osvaldo Freitas, Olavo Santos e Zuleide Lima por todo o aprendizado nas disciplinas.

Agradecimento à Professora Fatima Alves por tanto aprendizado útil à dissertação.

Ao Geólogo Mattheus Prudêncio pelos esclarecimentos.

À secretária Raphaela Teixeira pelo apoio com os assuntos da secretaria.

E aos meus pais, José Ribamar e Maria de Fátima, pelo amor e apoio que me deram hoje e sempre.

SUMÁRIO

Lista de figuras

Lista de tabelas

CAPÍTULO 1

1	Introdução.....	16
1.1	Hipótese.....	17
1.2	Objetivos – Geral e Específico.....	18
1.3	Organização.....	18

CAPÍTULO 2

2	Revisão de Literatura.....	20
2.1	Batimetria.....	20
2.2	Batimetria por Satélite.....	20
2.3	Interpolação de Dados Batimétricos.....	21
2.3.1	Inverso da Potência das Distâncias - IDP.....	21
2.3.2	Krigagem.....	22
2.3.3	Mínima Curvatura.....	22
2.3.4	Método de Shepard Modificado.....	23
2.3.5	Vizinho Natural.....	23
2.3.6	Vizinho Mais Próximo.....	24
2.3.7	Regressão Polinomial.....	24
2.3.8	Função de Base Radial.....	24
2.3.9	Triangulação com Interpolação Linear.....	25
2.3.10	Média Móvel.....	25
2.3.11	Métrica de Dados.....	25
2.3.12	Polinômio Local.....	25

CAPÍTULO 3

3	Caracterização da Área de Estudo.....	29
3.1	Localização.....	29
3.2	Caracterização Físico-Ambiental.....	30
3.2.1	Forçantes Meteoceanográficas.....	30
3.2.2	Geologia e Geomorfologia da Plataforma Continental.....	32

CAPÍTULO 4

4	Materiais e Métodos.....	37
4.1	Material.....	37
4.1.1	Cartas Náuticas.....	38
4.1.2	Batimetria Petrobras/UFRN (GEMMA/GEOPRO).....	40
4.1.3	Imagem de satélite.....	42
4.2	Metodologia.....	43
4.2.1	Estimativa de Batimetria Por Imagem de Satélite.....	44
4.2.1.1	Método Mcfeeters (1996).....	45
4.2.1.2	Método Philpot (1989).....	47
4.2.2	Compatibilização dos dados.....	48
4.2.2.1	Análise de Regularização dos Dados Petrobras/UFRN.....	49
4.2.2.2	Malha Padrão.....	49
4.2.3	Interpolação.....	50
4.2.4	Análise Estatística.....	50
4.2.4.1	Validação Cruzada.....	51
4.2.4.2	MAPE, RMSE, Coef. de Correlação e Índice de Concordância.....	51

CAPÍTULO 5

5	Resultados e Discussão.....	53
5.1	Aplicação do Índice de Diferença Normalizada da Água.....	53
5.1	Métodos de extração de batimetria de imagem de satélite.....	57
5.2	Quantidade de pontos necessários do dado Petrobras/UFRN.....	61
5.3	Análise visual dos interpoladores.....	66
5.4	Análise quantitativa dos interpoladores.....	69

CAPÍTULO 6

6	Considerações finais.....	78
6.1	Conclusões.....	78
6.2	Recomendações para trabalhos futuros.....	80
	Referências Bibliográficas.....	81

Lista de figuras

Figura 2.1 - Resultado de interpolações Vizinho Natural; (Fonte: Meneses e Almeida, 2012).....	23
Figura 3.1 - Mapa de localização da área de estudo no litoral setentrional do Estado do Rio Grande do Norte (RN), Nordeste do Brasil.....	29
Figura 3.2 - Mapa da região litorânea norte do RN, mostrando a direção predominante dos ventos e da corrente da deriva litorânea. Dados obtidos de medições realizadas em estações meteorológicas e direção de dunas. (Modificado de Fortes, 1987).....	31
Figura 3.3 - Imagem Landsat 7 processada (Gomes, 2007) destacando as principais feições geomorfológicas submersas da área de estudo. A) Campos de Dunas longitudinais; B) Dunas subaquosas longitudinais; C) Paleocanais do Rio Açu (leste) e Rio Mossoró (oestes); D) Campos de Dunas transversais; E) Linhas de rochas praias (<i>beachrocks</i>); F) Corpos arenosos isolados.....	34
Figura 3.4 – Carta Sedimentológica para a plataforma continental brasileira entre Galinhos e Macaus (NE Brasil) (Vital et al., 2005)	36
Figura 4.1 – Delimitações das áreas de abrangência de cada dado. Dados de CN-720 na parte azul e roxa, dados Petrobras, na região roxa e imagem de satélite nas áreas azul, roxa e verde.....	38
Figura 4.2 - Carta náutica de Areia Branca a Guamaré mostrando nuvem de pontos. Cada ponto na figura tem descrito sobre ele o valor da profundidade da coluna d'água naquele local. – Adaptado do Centro de Hidrografia da Marinha (https://www.mar.mil.br/dhn/chm/box-cartas-raster/raster_disponiveis.html). Carta de 31/05/2016, código:720.....	39
Figura 4.3 - Dados de carta náutica digitalizados. Nessa imagem cada ponto tem um valor de profundidade correspondente. Além do mais, como se trata de	

uma carta náutica digitalizada esses pontos são associados a um vetor de um arquivo .Shapefile.....	40
Figura 4.4 - Esquema de funcionamento de um sonar mostrando emissão da onda (ou ultra-som) pelo transmissor do ecobatímetro, reflexão no fundo do mar e recepção da onda refletida pelo aparelho.....	41
Figura 4.5 - Dados de Batimetria Petrobras/UFRN. Nessa imagem as linhas representam um conjunto bastante adensado de pontos levantado usando ecobatímetro a bordo de uma embarcação. O distanciamento médio vertical entre os pontos é de 100 metros e o distanciamento médio horizontal é de 1000 metros.....	42
Figura 4.6 - Dados de Sensoriamento Remoto. Imagem de composição Landsat-8 OLI/TIRS (1 junho de 2004) colorida. Fonte: United States Geological Survey https://earthexplorer.usgs.gov/ . Identificadores: LC82150642013152LGN00 e LC82150632013152LGN00.....	43
Figura 4.7 - Organograma mostrando funcionamento da metodologia, no topo, “Cartas Náuticas”, “Batimetria Petrobras/UFRN” e “Dados de Imagem de Satélite” são os dados de entrada. Um nível abaixo “Estimativa da Batimetria. Métodos Mcfeeters (1996) e Philpot” é a primeira etapa do processo onde a batimetria é estimada a partir de dados de Imagem de Satélite. Continuando um nível abaixo tem-se “Compatibilização dos Dados” onde os dados serão compatibilizados para poderem ser comparados entre si. Em seguida é feita a etapa de interpolação dos dados e análise estatística gerando os resultados esperados.....	44

Figura 4.8 - Procedimento para Extração da Batimetria – Método Mcfeeters (1996). Primeiramente é feita a eliminação de erros provocados pela atmosfera em “Correção Atmosférica”, em seguida o NDWI é calculado usando o sinal das bandas 5 e 3. Na etapa 3 é feita uma correlação entre a profundidade e o NDWI, gerando uma função de estimativa da profundidade. Então essa função é usada na etapa 4 para calcular a profundidade associados a todos os pixels da região de interesse e por fim na etapa 5 é gerada uma nuvem de pontos em uma malha regular de 30x30m.....	47
Figura 4.9 – Perfil da superfície da crosta terrestre, indicando o fundo sobre água oticamente profunda.....	48
Figura 5.1 - Representação dos valores de NDWI em Preto e Branco. Nessa imagem a parte em Preto e Branco é a imagem de satélite, a parte laranja o continente representado em um arquivo .shapefile e a parte azul foi colocada para excluir uma região que não era necessária aparecer, ela coincide com a isobata de 50 m da carta náutica. Na imagem de satélite, a imagem está representada por pixel em tons de cinza, associados ao valor do NDWI.....	53
Figura 5.2 - NDWI em pseudocolor com efeito hillshade. Nessa imagem é apresentado o NDWI associado a uma escala de cores. O NDWI varia de -1 a 1 e cada valor dentro desse intervalo possui uma cor específica.....	54
Figura 5.3 - (a) Disposição inicial dos dados Petrobras/UFRN e definição da ROI. (b) Interseção entre os dados Petrobras/UFRN e a ROI.....	56
Figura 5.4 - Correlação Profundidade vs. NDWI. Nessa imagem tem-se no eixo vertical a profundidade e no eixo horizontal o NDWI. Como cada ponto do levantamento Petrobras/UFRN está associado a um valor de NDWI, pode-se plotar esse gráfico e montar uma curva de correlação em busca de uma função que melhor se enquadre os dados.....	57

Figura 5.5 - Profundidade em pseudocolor pelo método Mcfeeters (1996). Nela cada cor está associada a uma profundidade. A escala no canto superior direito indica seus valores.....	59
Figura 5.6 - Profundidade em pseudocolor. Nessa imagem é apresentado os valores de profundidade da região obtidos pelo método Philpot (1989). As partes em branco são regiões que não puderem ter o valor de profundidade calculado pelo método.....	60
Figura 5.7 - Indicação dos perfis traçados. Perfil 1 sobre a longitude 36°54'27"O, Perfil 2 sobre a longitude 36°36'47"O e Perfil 3 sobre a longitude 36°19'39"O...	61
Figura 5.8 - Perfis gerados a partir dos dados levantamento batimétrico Petrobras/UFRN para 100%, 75%, 50% e 25% dos dados e Perfil gerado a partir de levantamento por imagem de satélite usando método Mcfeeters (1996) na coordenada X = 731.970 m no sistema UTM – WGS 84 – Zona 24S.....	62
Figura 5.9 - Perfis gerados a partir dos dados levantamento batimétrico Petrobras/UFRN para 100%, 75%, 50% e 25% dos dados e Perfil gerado a partir de levantamento por imagem de satélite usando método Mcfeeters (1996) na coordenada X = 764.640 m no sistema UTM – WGS 84 – Zona 24S.....	62
Figura 5.10 - Perfis gerados a partir dos dados levantamento batimétrico Petrobras/UFRN para 100%, 75%, 50% e 25% dos dados e Perfil gerado a partir de levantamento por imagem de satélite usando método Mcfeeters (1996) na coordenada X = 796.320 m no sistema UTM – WGS 84 – Zona 24S.....	63
Figura 5.11 - Resultado da Interpolação dos dados de Batimetria de Imagem de satélite pelo método Mcfeeters (1996) usando como método: (a) Krigagem (b) Regressão Polinomial (c) Vizinho mais Próximo (d) Data Metrics.....	66
Figura 5.12 - Resultado da Interpolação dos dados de Batimetria de Imagem de satélite pelo método Mcfeeters (1996) usando como método: (a) Triangulação Com Interpolação Linear (b) Função de Base Radial (c) Polinômio Local (d) Vizinho Natural.....	67

Figura 5.13 - Resultado da Interpolação dos dados de Batimetria de Imagem de satélite pelo método Mcfeeters (1996) usando como método: (a) Média Móvel (b) Curvatura Mínima (c) Shepard Modificado (d) Inverso da Potência das Distâncias..... 68

Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Principais vantagens e desvantagens de cada interpolador, parte 1. Fonte: Yang et al., (2013) e Golden software (2012).....	27
Tabela 2.2 – Principais vantagens e desvantagens de cada interpolador, parte 2. Fonte: Yang et al., (2013) e Golden software (2012).....	28
Tabela 5.1 - Índice de Correlação (R^2), índice de concordância (d), Validação Cruzada, MAPE e RMSE para as batimetrias com 25%, 50%, 75% e 100% dos dados de batimetria in loco Petrobras/UFRN, nos perfis na coordenadas $x= 731.970$ m, $x= 764.640$ m e $x= 796.320$ m no sistema UTM-Zona-24-Sul.....	64
Tabela 5.2 - Valores de Validação Cruzada para cada Interpolador, comparando o próprio dado de origem com o dado de saída.....	69
Tabela 5.3 - Valores de coeficiente de correlação, índice concordância, MAPE, RMSE e Validação cruzada para cada interpolador, para cada dado.	70
Tabela 5.4 - Valores de coeficiente de correlação, índice concordância, MAPE, RMSE e Validação cruzada para cada interpolador, ordenados de acordo com os maiores valores de índice de correlação.....	71
Tabela 5.5 - Valores de coeficiente de correlação, índice concordância, MAPE, RMSE e Validação cruzada para cada interpolador, ordenados de acordo com os maiores valores de índice de concordância.....	72
Tabela 5.6 - Valores de coeficiente de correlação, índice concordância, MAPE, RMSE e Validação cruzada para cada interpolador, ordenados de acordo com os menores valores do módulo do MAPE.....	73

Tabela 5.7 - Valores de coeficiente de correlação, índice concordância, MAPE, RMSE e Validação cruzada para cada interpolador, ordenados de acordo com os menores valores de RMSE..... 74

Tabela 5.8 Valores de coeficiente de correlação, índice concordância, MAPE, RMSE e Validação cruzada para cada interpolador, ordenados de acordo com os maiores valores de validação cruzada..... 75

Tabela 5.9 - Ranking de classificação dos interpoladores que tiveram os melhores resultados considerando o índice de correlação, índice de concordância, MAPE, RMSE e Validação Cruzada..... 76

CAPÍTULO 1

Introdução

O Brasil tem um dos litorais mais extensos do mundo com mais de 8.500 km de extensão (MMA, 2018) e muitas de suas cidades foram instaladas próximas ao litoral e estão sujeitas às consequências de uma ocupação não planejada, como ressacas, erosão costeira, impacto paisagístico, ecológicos, etc.

Para encontrar soluções de remediação e prevenção é necessário o estudo batimétrico dessas regiões. O levantamento batimétrico consiste no mapeamento da plataforma continental, pode ser feito de forma tradicional com levantamento *in loco* usando uma embarcação ou com Imagem de Satélite para áreas rasas. O desenvolvimento de modelos batimétricos tem uma grande importância no estudo de ambientes subaquáticos e sua influência em zonas litorâneas. Os modelos batimétricos podem ser obtidos por dados de imagem de satélite e também por dados de levantamento *in loco*. Os dados são interpolados e em seguida montam-se modelos digitais do terreno, que podem ser usados nos estudos de ambientes aquáticos. Muitas vezes, o modelo digital do terreno é o único tipo de dado disponível para inferir a respeito da geologia do fundo do oceano, como explica Bello e Hernández (2007). É evidente a importância de se realizar estimativas batimétricas em vários campos da ciência e avaliar os ambientes marinhos. Segundo Wright *et al.* (2000) e Klenke e Schenke (2002), essa estimativa é uma ferramenta aplicada ao estudo dos processos físicos oceanográficos como correntes marinhas, marés e contaminação de águas.

Batimetria pode ser definida como um processo de medição da profundidade de um corpo d'água, que gera como produto um mapeamento do relevo submerso, conforme Bowles & Jung (1998). Šiljeg *et al.* (2015) ainda definem batimetria contemporânea como o campo dentro da hidrografia, considerada uma ciência de medição da profundidade e determinação de propriedades físicas de características

de áreas submersas baseada na análise obtida a partir de perfis medidos. A medição e representação do relevo do fundo marinho é o que se pode chamar de mapeamento e para produzi-lo, realiza-se um levantamento com um barco, que mede, por meio de diferentes técnicas, a profundidade de fundo de vários pontos ao longo da região de interesse. Essa medição de profundidade também pode ser feita utilizando imagens de satélites, onde é possível calculá-la por meio de seu processamento digital de acordo com Murphy et al. (2010). Com isso tem-se um conjunto de pontos, também chamado de nuvem de pontos, com coordenadas a elas associadas. Esses são dados brutos e na maioria das vezes estão dispostos de forma irregular. Para gerar um mapeamento, é necessário regularizá-los em uma malha interpolando seus valores de profundidade por meio de um interpolador matemático. Em seguida monta-se uma superfície a partir da malha. Essa é a batimetria que se busca, também chamada de Modelo Digital do Terreno (MDT). Segundo Panhalkar & Amol (2015), o MDT diferente da nuvem de pontos é um dado de representação contínua e serve como valor de entrada para softwares de modelos numéricos de circulação hidrodinâmica. Atualmente existem mais de 40 métodos de interpolação descritos na literatura, conforme explica Li et al. (2015). Até agora não existe uma conclusão de qual é o melhor método e isso mostra a importâncias de se avaliar diferentes formas de interpolação para cada caso. A análise estatística é uma ferramenta importante para essa análise pois pode fornecer parâmetro quantitativos de referência.

1.1 HIPÓTESE

Amaro *et al.* (2013) explicaram que a porção do litoral setentrional do Estado Rio Grande do Norte (RN), na costa do Nordeste brasileiro, é caracterizada pela ação de vários processos de erosão/acreção costeira e alterações significativas da morfologia. É um local onde há variação no balanço de volumes de sedimentos das praias e que ultimamente vem acontecendo aberturas e barramento de canais de maré. Estão se formando no continente canais de marés, onde é possível também de constatar formação de ilhas barreiras e movimento ativo de forma contínua.

Atualmente existem vários métodos de interpolação descritos na literatura, conforme explica Li e Heap (2008). No entanto, até o momento não existe uma

conclusão de qual o método mais apropriado para levantamentos batimétricos e isso mostra a importância de se avaliar diferentes formas de interpolação para cada caso. Moura (2010) fez a análise de interpoladores usando dados de batimetria obtidos por Cartas Náuticas e dados de batimetria obtidos *in loco*. Em seu trabalho foram avaliados uma série de 12 interpoladores

A hipótese desse trabalho é de que se for usada uma batimetria proveniente de uma imagem de satélite para fazer uma análise quantitativa pode-se obter um resultado diferente do convencional. Portanto, esse trabalho se propõe a responder à pergunta: Sabendo que existe um estudo de comparação e análise de interpoladores em dados de extração de batimetria na plataforma continental setentrional do estado do Rio Grande do Norte, seria possível uma imagem de satélite colaborar para esse estudo?

1.2 OBJETIVOS – GERAL E ESPECÍFICOS

O objetivo geral deste trabalho foi estudar os interpoladores usados na extração de batimetria feito por Cartas Náuticas e por dados Petrobras/UFRN (GEMMA/GEOPRO) na plataforma continental da Bacia Potiguar e os métodos de extração de batimetria por Imagem de Satélite de forma quantitativa.

Os objetivos específicos são:

- 1 - Comparação dos métodos de extração de batimetria de imagem de satélite Mcfeeters (1996) e Philpot (1989)
- 2 - Verificação da quantidade mínima de pontos necessários do dado batimétrico Petrobras/UFRN por questões econômicas
- 3 - Análise visual e quantitativa dos interpoladores usados nos dados de Imagem de satélite.
- 4 - Fazer uma comparação quantitativa dos resultados de interpoladores usados nos dados de carta náutica e Petrobras/UFRN por meio de batimetrias de Imagem de Satélite.

1.3 ORGANIZAÇÃO

A dissertação está organizada da seguinte maneira: no capítulo 2 é apresentada uma revisão de literatura dos assuntos abordados. No capítulo 3, a

caracterização da área de estudo. No capítulo 4, materiais e métodos de processamento digital de imagem, de interpolação e a forma de se analisar os resultados. No capítulo 5 são apresentados os resultados propriamente ditos mais as discussões e no capítulo 6 as considerações finais.

CAPÍTULO 2

Revisão de Literatura

2.1 BATIMETRIA

Segundo Bowles e Jung (1998), a batimetria pode ser definida como um processo de medição da profundidade de um corpo d'água, que gera como produto um mapeamento do relevo submerso. Mais recentemente, Šiljeg *et al.* (2015) ainda definiu batimetria contemporânea como o campo dentro da hidrografia, considerada uma ciência de medição da profundidade e determinação de propriedades físicas de áreas submersas. A medição e representação do relevo do fundo marinho é o que se pode chamar de mapeamento e para produzi-lo, realiza-se um levantamento com um barco, que mede, por meio de um ecobatímetro chamado sonar, a profundidade do fundo de vários pontos ao longo da região de interesse. Outra forma de medir a profundidade é utilizando imagem de satélite, onde é possível calculá-la por meio de seu processamento digital de acordo com Murphy *et al.* (2010). Com isso tem-se um conjunto de pontos, também chamado de nuvem de pontos, com coordenadas a eles associado no plano x,y e na profundidade z. Esses são dados brutos e na maioria das vezes estão dispostos de forma irregular.

2.2 BATIMETRIA POR SATÉLITE

No sensoriamento remoto existem duas formas de se obter a batimetria de plataforma rasa: com sensorres passivos (Landsat, por exemplo) e ativos (Lidar). Segundo Accioly *et al.* (2002), a maior parte dos métodos encontrados na literatura para a extração de profundidade trabalha com valores de radiância recebidos pelo sensor. Uma forma de transformar os valores do nível de cinza do pixel em valores de radiância para imagens de 16 bits é por meio da equação 2.1:

$$L_{di} = L_{imín} + \frac{L_{imáx} - L_{imín}}{65535} \cdot NC \quad (\text{EQUAÇÃO 2.1})$$

Onde “ L_{di} ” é a radiância observada pelo sensor na banda “ i ”; “ $L_{imín}$ ”, a radiância mínima recebida pelo sensor na banda “ i ”, e “ $L_{imáx}$ ”, a radiância máxima observada pelo sensor na banda “ i ”, estimadas de acordo com a área de estudo. “ NC ” é o nível de cinza recebido pelo sensor.

2.3 INTERPOLAÇÃO DE DADOS BATIMÉTRICOS

Para gerar um mapeamento é necessário regularizá-lo em uma malha interpolando seus valores de profundidade por intermédio de um interpolador matemático. Existem vários interpoladores, foram escolhidos para se usar nesse trabalho os interpoladores mais clássicos disponíveis no *software* Surfer. Uma vez os dados interpolados, monta-se uma superfície a partir da malha. Essa é a batimetria que se busca, também chamada de Modelo Digital do Terreno (MDT).

Os métodos de interpolação geoestatísticos são denominados de “métodos de previsão espacial”, enquanto que métodos não geoestatístico são denominados de simplesmente de “interpolação espacial”, segundo Murphy *et al.* (2010). Para simplificar, denomina-se nesse estudo “interpolação”, todos métodos, seja de “previsão” ou de “interpolação espacial”. De acordo com Curtarelli (2015), dados de imagem de satélite têm a vantagem de abranger grandes áreas.

2.3.1 Inverso da Potência das Distâncias – IPD (*Inverse Distance to a Power*)

Esse é um método que para calcular a profundidade em um dado posicionamento tem que fazer uma média ponderada com as demais profundidades de valores conhecidos, onde o peso da média é o inverso da distância a cada ponto elevado a uma dada potência. Assim, a influência da profundidade de um ponto em relação a outro decresce com o aumento da distância entre eles. Sua forma geral é na potência de 2, nesse caso denomina-se o método de inverso quadrado da

distância. Quanto maior for o valor da potência maior será a influência dos pontos mais próximos, já para valores de potência menores a influência dos mais próximos é mais parecida com a influência dos pontos mais distantes (Yang *et al.*, 2013).

2.3.2 Krigagem (Kriging)

Segundo a *Golden Software* (2012), krigagem é um método flexível e que produz mapas de boa aparência a partir de uma distribuição irregular, procurando expressar tendências que são sugeridas nos dados.

Essa técnica tem o princípio parecido com a anterior, em que pontos mais próximos tendem a ter valores de profundidade mais próximo do que valores mais afastados. O termo abrange um conjunto de métodos, os mais comuns são:

Krigagem simples – parte da hipótese de que as médias locais são relativamente constantes e seu valor é próximo a da população, portanto a média da população é usada para estimativas locais.

Krigagem Normal – As médias locais não são necessariamente parecidas com as médias da população e, portanto, a estimativa local é feita usando apenas sua vizinhança.

2.3.3 Mínima Curvatura (Minimum Curvature)

É um método de interpolação que gera uma superfície global composta de superfícies planas ligadas entre si através de dobras com valores mínimos de curvatura (Golden Software, 2012). Esse que gera superfícies suaves e extrapola a profundidade para fora da área de domínio e pode criar grandes erros para regiões sem dados (Yang *et al.*, 2013).

O método de curvatura mínima consiste em produzir uma malha aplicando uma equação sobre os pontos repetidamente para suavizar o resultado. Cada vez que a equação é aplicada, uma iteração é contabilizada. O processo é repetido até que “máximo valor residual” seja atingido ou até que o número máximo de iterações seja alcançado. Ambos valores podem ser configurados no *software*.

2.3.4 Método de Shepard Modificado (*Modified Shepard's Method*)

Segundo a Golden Software (2012), trata-se de uma técnica parecida com o Inverso da Potência das Distâncias, com o diferencial de associar consigo o método da soma dos mínimos quadrados. Isso resulta na redução de erros chamados “olho de búfalo” que o Inverso da Potência das Distância pode apresentar em suas curvas de nível. Segundo Yang *et al.* (2013), o Método de Shepard Modificado pode extrapolar valores de profundidade para fora do alcance do domínio.

2.3.5 Vizinho Natural (*Natural Neighbour*)

É baseado na média ponderada dos pontos vizinhos, onde o peso são as áreas dos Polígonos de Thiessen do Diagrama de Voronoi. O Diagrama de Voronoi é uma forma de dividir uma área em polígonos (chamados Polígonos de Thiessen) baseado nas distâncias entre os pontos. Quando novos pontos são inseridos os polígonos mudam de tamanho e um novo polígono é formado. A área desse novo polígono representa a influência do ponto vizinho, e ela é usada como peso da média ponderada (Golden Software, 2012). Esse método não extrapola a profundidade para fora do domínio (Yang *et al.*, 2013).

Um exemplo de vizinho natural é mostrado na Figura 2.1.

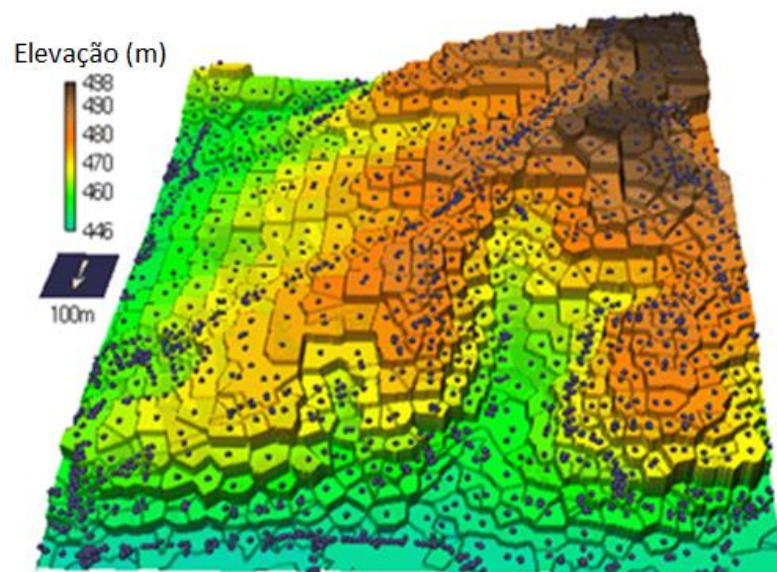


Figura 2.1 - Resultado de interpolações Vizinho Natural. Fonte: Meneses e Almeida (2012).

2.3.6 Vizinho Mais Próximo (*Nearest Neighbour*)

O método do vizinho mais próximo associa ao ponto da malha o valor do ponto mais próximo. É um método bastante útil quando os dados de entrada já estão dispostos aproximadamente no formato da malha regular e deseja-se convertê-lo em um arquivo .grd. Além do mais, quando se tem um dado de entrada aproximadamente igual a uma malha regular e ainda assim faltam pontos (lacunas na malha), o Vizinho mais Próximo é um método interessante para preenchê-las (Golden Software, 2012). Não extrapola os valores de profundidade para fora do domínio (Yang *et al.*, 2013).

2.3.7 Regressão Polinomial (*Polynomial Regression*)

O método da Regressão Polinomial é usado para definir tendências e padrões de larga escala nos dados. Não preserva os detalhes locais. É um método rápido para qualquer quantidade de dados (Golden Software, 2012). Quando o conjunto for grande pode ser uma alternativa interessante para substituir o método vizinho mais próximo (Yang *et al.*, 2013)

2.3.8 Função de Base Radial (*Radial Basis Function*)

Função de Base Radial é na verdade um conjunto de métodos de interpolação de dados. Em termo de capacidade para estimar uma malha representativa dos dados e produzir uma superfície suave, o Método Multiquadrático é considerado por muitos como o melhor (Golden Software, 2012). É possível implantar um fator de suavização para melhorar a qualidade da superfície e por isso é considerado um método com alta capacidade de produzir uma superfície suave. Segundo Yang *et al.* (2013), trata-se de um método flexível e que produz resultados parecidos com o da krigagem (Yang *et al.*, 2013).

2.3.9 Triangulação com Interpolação Linear – (*Triangulation With Linear Interpolation*)

A Triangulação com Interpolação Linear usa a forma otimizada da triangulação de Delaunay (a mesma que forma o diagrama de Voronoi).

Cada triângulo define um plano sobre a malha de pontos, onde a altitude de cada vértice do plano triangular é a própria altitude do ponto ao qual ele está associado (Golden Software, 2012).

2.3.10 Média Móvel (*Moving Average*)

Trata-se de um método que associa valores para os pontos da malha baseado basicamente na média dos pontos vizinhos que estejam dentro de uma elipse com centro no ponto da malha (Golden Software, 2012).

Método com bons resultados quando se trata de um conjunto de dados grande. Pode ser uma alternativa interessante à substituição do método do vizinho mais próximo, quando o conjunto de dados além de ser grande for regularmente espaçado (Yang *et al.*, 2013) .

2.3.11 Métrica de Dados (*Data Metrics*)

Métrica de Dados é uma coleção de métodos de interpolação para criar uma malha de informação sobre os dados (Golden Software, 2012).

No geral não é um interpolador para valores de 'z' em um conjunto de dados e é usado para criar redes de informação sobre os dados (Yang *et al.*, 2013).

Segundo a Golden Software (2012), é possível obter informações como: o número de pontos usados na interpolação para calcular o valor de um ponto da malha; o desvio padrão, variância, coeficiente de variação, mediana dos dados vizinhos, a distância do ponto mais próximo, dentre outros.

2.3.12 Polinômio Local (*Local Polynomial*)

Segundo a Golden Software (2012), o método do Polinômio Local, associa valores através de uma média ponderada baseada na soma dos quadrados mínimos

das distâncias dos pontos inscritos dentro de uma elipse em volta do ponto da malha. É o método mais interessante de se aplicar quando o conjunto de dados são localmente suavizados. Sua velocidade computacional não é significativamente afetada pelo tamanho do conjunto de dados (Yang *et al.*, 2013).

A seguir é apresentado o quadro resumo.

Interpolador:	Inverso da Potência das Distâncias	Krigagem	Mínima Curvatura	Método de Shepard Modificado	Vizinho Natural	Vizinho mais Próximo
Vantagens:	Permite a suavização da superfície	Método flexível, produz mapas de boa aparência a partir de uma distribuição irregular	Permite criar uma boa suavização mantendo também uma boa fidelidade aos dados de entrada	Redução de erros "olho de búfalo" em comparação ao Inverso da Potência das Distâncias.		Método bastante útil quando os dados de entrada já estão dispostos aproximadamente no formato da malha regular e deseja-se convertê-lo em um arquivo .grd.
Desvantagens:	Pode gerar olhos de búfalo		Pode criar grandes erros para regiões sem dados		Não extrapola profundidade para fora do domínio.	

Tabela 2.1 – Principais vantagens e desvantagens de cada interpolador, parte 1. Fonte: Yang et al., (2013) e Golden software (2012)

Interpolador:	Regressão polinomial	Função de base radial	Triangulação com Interpolação Linear	Média Móvel	Métrica de Dados	Polinômio Local
Vantagens:	Útil para definir tendências e padrões de larga escala nos dados. É um método rápido para qualquer quantidade de dados.	Considerado um método com alta capacidade de produzir uma superfície suave.	Produce bons resultados quando os dados estão uniformemente distribuídos	Método com bons resultados quando se trata de um conjunto de dados grande.	Permite o cálculo da desvio padrão, variância e coeficiente de variação dos dados para cada ponto da malha	Sua velocidade computacional não é significativamente afetada pelo tamanho do conjunto de dados.
Desvantagens:	Não preserva os detalhes locais					

Tabela 2.2 – Principais vantagens e desvantagens de cada interpolador, parte 2. Fonte: Yang et al., (2013) e Golden software (2012)

CAPÍTULO 3

Caracterização da Área de Estudo

3.1 Localização

A área de estudo onde foi realizado o trabalho se encontra na plataforma continental setentrional do Estado do Rio Grande do Norte, conforme indicado na Figura 3.1.

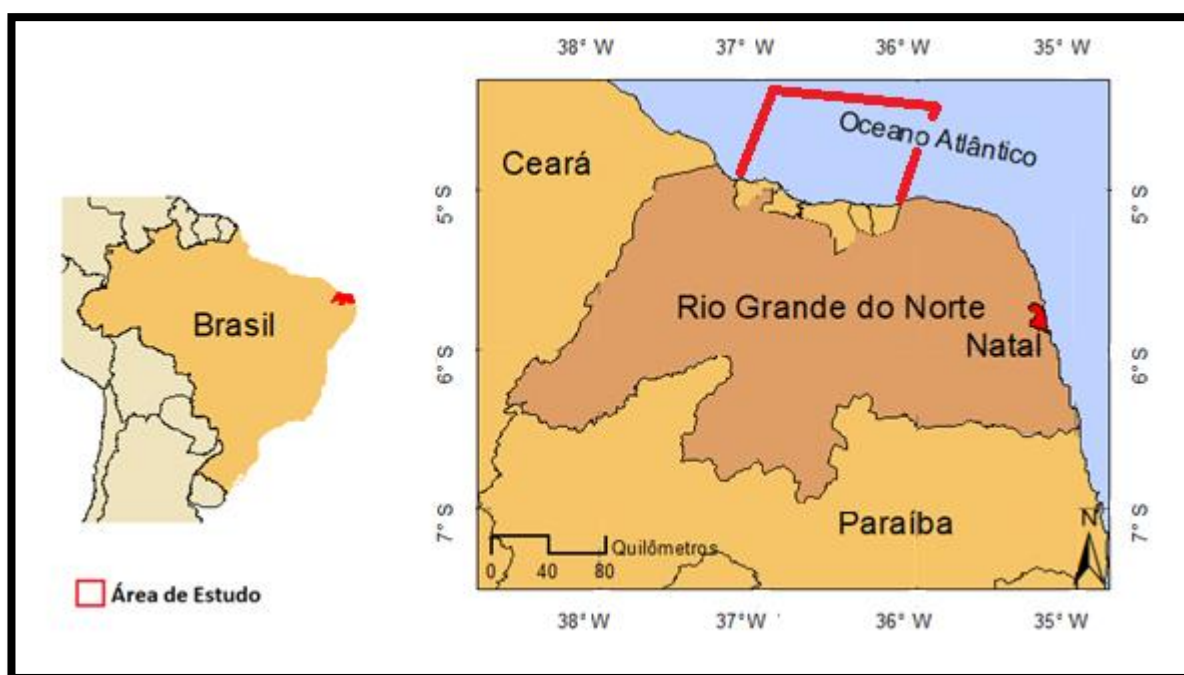


Figura 3.1 - Mapa de localização da área de estudo no litoral setentrional do Estado do Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil.

3.2 Caracterização Físico-Ambiental

3.2.1 Forçantes Meteoceanográficas

Ondas

As ondas de maiores períodos propagam-se entre o intervalo de 05h00 e 08h00, com médias máximas de 6,67 e 7,87s, sendo as mais frequentes as ondas com períodos médios entre 4,3 e 5,5s na região mais próxima da costa. Na região mais distante da costa, os maiores períodos médios variam em horários de 05h00 e 10h00, com valores entre 6,9s e 8,1s, sendo os períodos médios mais frequentes entre 3,3 e 4,5s. Tais valores indicam que as ondas são predominantemente geradas por ventos locais (Matos *et al.*, 2011).

Na região mais distante da costa 78% das direções médias das ondas variaram entre 0,15° a 90°, caracterizando as ondas neste posto predominantemente de NE. Já os valores os valores médios direcionais na região mais próxima indicaram direções mais entre 179° a 269°.

Marés

Aa região de estudo é caracterizada por mesomarés semidiurnas, onde o nível médio (Z0) estabelecido foi 123 cm acima do RN (Nível de Redução) com média de preamares de sizígia de 234 cm acima do RN, média de preamares de quadrature de 221 cm, media de baixa-mares de sizígia de 43 cm abaixo do RN e média das baixas-mares de quadrature de 56 cm (Góis, 2008).

Ventos

Segundo Frazão (2016) os ventos na região podem atingir 9 m/s. A velocidade média foi de 4,9 m/s entre os anos de 2002 a 2012, valor mínimo de 4,2 m/s e máximo de 6,7 m/s, ou seja, amplitude de 2,2 m/s. A velocidade de 4,9 m/s foi o valor mediano e não houve valor modal. Já as direções médias variaram de 85° a 141,5°, correspondendo aos ventos de NE e SE peculiares à área, com a direção

média e mediana de $111,6^\circ$ e 112° , respectivamente, conforme Figura 3.2 (Matos, 2013).

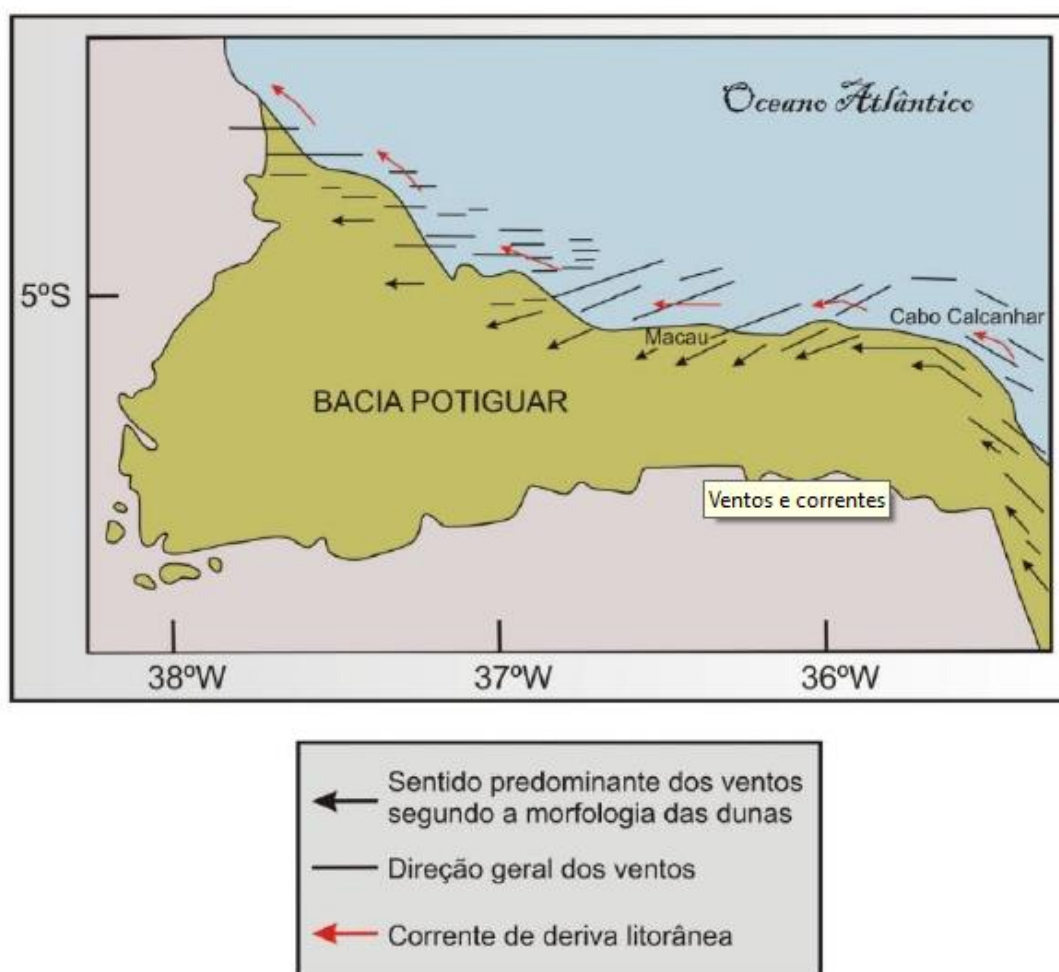


Figura 3.2 - Mapa da região litorânea norte do RN, mostrando a direção predominante dos ventos e da corrente da deriva litorânea. Dados obtidos de medições realizadas em estações meteorológicas e direção de dunas. (Modificado de Fortes, 1987)

Correntes

As correntes nessa região são fortemente influenciadas por três fatores principais: (i) a orientação da linha de costa (predominantemente no sentido E-W), (ii) dos ventos (direção preferencial E-NE) e (iii) dos fluxos de ondas (vindo de NE-E). Isso provoca na direção de E para W uma deriva litorânea. Trata-se um do transporte de sedimentos provocado por uma corrente paralelo à costa (Costa, 2015). A velocidade máxima anual da corrente foi entre 0,85 e 1,63 m/s no decorrer Chaves et

al., 2006). No fluxo de maré vazante observou-se uma corrente de maior intensidade o que favorece o desenvolvimento de deltas de maré vazante e pequenos pontais arenosos na região (Vital, 2009).

3.2.2 Geologia e Geomorfologia da Plataforma Continental

Para poder analisar os resultados dos resultados das extração de batimetria por imagem de satélite é interessante antes de mais ainda compreender a geologia e a geomorfologia da área de estudo.

As dunas submersas na região, segundo Lima (2006), são feições com amplitude de 1 a 5 m em relação ao fundo, com orientação preferencial das cristas na direção NE e apresentam geralmente comprimento de onda de 200 m a 1,5 km.

Na Figura 3.3 destacam-se os campos de dunas paralelos à linha de costa, em uma profundidade entre 5 e 10 m na região à frente de Guamaré e Galinhos. As praias na região são planas no geral e apresentaram faixas de detritos, tais como areias, cascalhos, seixos e pedregulhos (Costa Neto, 2009).

A plataforma pode ser dividida em plataforma interna, média e externa com base na caracterização geomorfológica e sedimentológica. A plataforma interna é limitada pela isóbata de 15 m com relevo suave envolvendo extensos campos de dunas longitudinais, com predominância de sedimentos siliciclásticos; a plataforma média está limitada entre as isóbatas de 15 m e 25 m, caracterizada pela ocorrência mista de sedimentos e dunas transversais; a plataforma externa é estreita com declividade superior à da plataforma média e limita-se entre as isóbatas de 25 até 40 m de profundidade. O limite entre a plataforma média e externa é bem marcado, na porção central desta plataforma, por uma extensa linha de antigas rochas praias. Essa região de plataforma externa apresenta predominância de sedimentos bioclásticos e proeminentes desníveis batimétricos. Do limite externo da plataforma ao início da planície abissal, ocorre um desnível superior a 2000 m sobre o talude e o sopé continental. As principais feições submarinas observadas sobre a plataforma continental são: região de dunas subaquáticas (na porção oeste da área, campos de dunas de Galinhos e dunas longitudinais frente a Diogo Lopes); campo de dunas longitudinais na plataforma interna; os vales incisos do Rio Açú e do Rio Apodi-

Mossoró (os rios mais importantes da região); dunas transversais na plataforma média; rochas praias (*beachrocks*); e corpo arenoso marinho raso isolado (Coroa das Lavadeiras na porção E da área) (Gomes *et al.*, 2010).

Paleocanal

Situado ao largo da foz do rio Açu, com direção NE, existe a formação de um paleocanal que apresenta largura média de 4 km, se estendendo a aproximadamente 23 km da linha de praia e apresenta um fundo plano.

A uma profundidade de 14 m, existe uma base de aproximadamente 550 m de largura que divide o canal em dois setores: o interno (lado da linha de praia) com profundidade máxima de 22 m e o externo (lado do mar aberto) com profundidade máxima de 24 m. O paleocanal é um local de deposição de sedimentos carregados pelos rios da região em direção a plataforma, na forma de uma pluma de sedimentos em suspensão e também das areias trazidas pela deriva litorânea (Góis, 2008).

Dunas Subaquosas (Bancos Arenosos)

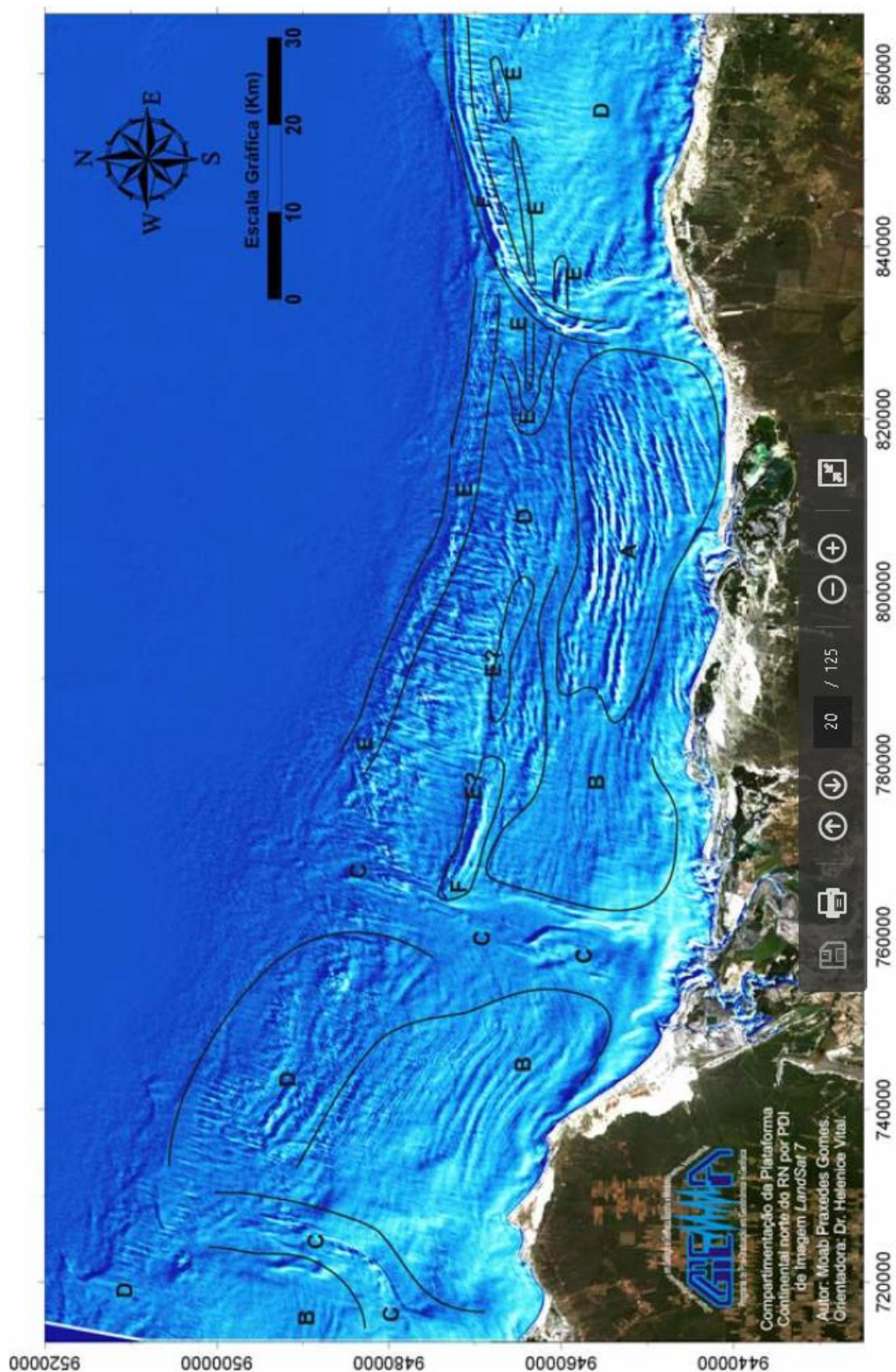
Geralmente apresentam uma morfologia de cristas e cava, com larguras que variam de 300 a 800 m e alturas relativas de 1 a 3 m. São de caráter contínuo e com orientação paralela a linha de praia, entre as profundidades de 2 a 5 m. Observa-se a presença de sedimentos lamosos nas cavas e de areias nas cristas.

As orientações paralelas a linha de praia deve-se provavelmente a corrente litorânea que é de E-W, porém em frente a Galinhos esses bancos arenosos apresentam um ângulo de 30° em relação à linha de costa (Góis, 2008).

Recifes

Os recifes constituem estruturas que se elevam do fundo submarino e estão distribuídos próximos à quebra da plataforma. Os pequenos recifes (urcas) apresentam relevo variando de 2,5 a 10 m e largura variando de 500 a 1000 m e podem ser representados pela urca do Minhoto, urca do Tubarão, urca da Conceição. Os recifes de grande extensão (riscas) apresentam extensão variando de 10 a 30

km, com larguras que variam de 1,5 a 5,0 km (Góis, 2008).



Caracterização Sedimentológica

A distribuição de fácies sedimentológicas ao longo da plataforma interna setentrional Rio Grande do Norte, no trecho compreendido entre Guamaré e Macau, permitiu o reconhecimento de 16 fácies distintas por Vital *et al.* (2005) (Figura 3.4), entretanto, apenas as 10 principais são representadas na Figura 3.4.

A fácie areia siliciclástica ocorre ao longo da costa, na região entre Guamaré e foz do rio Açu (Macau). É uma área de fundo marinho onde as formas de fundo são bem desenvolvidas, com boa visibilidade e representadas pelas dunas longitudinais com 2 a 3,5 m de altura.

As dunas longitudinais bem visíveis tendem a concentrar areia siliciclástica nas porções mais altas (cristas); enquanto areias silici-bioclásticas com grânulo cascalhos e areias biosiliciclásticas com grânulos e cascalhos concentram-se nas partes mais profundas entre as dunas de areia (calhas). Entretanto, devido à escala utilizada na carta sedimentológica da Figura 3.4 estas três fácies não foram diferenciadas em algumas regiões, sendo representadas apenas pelas fácies areia siliciclástica.

A fácie lama terrígena está limitada às áreas próximas a desembocadura dos rio e/ou braços de mar existente na região. A fácie marga arenosa, lama calcária e marga calcária ocorrem preenchendo o canyon submerso, resquício do antigo vale do rio Açu, aumentando o conteúdo de carbonato à medida que se distancia da costa.

A fácies areia biosilicilástica ocorre de forma aproximadamente elíptica, na região *offshore* entre a foz do rio Açu e a Ponta do Tubarão em fundo plano. Estas fácies ocorrem ainda na forma de uma faixa contínua *offshore* acompanhando a isóbata de 10 m, após o término das areias siliciclásticas.

A fácie areia silicibioclástica ocorre preferencialmente *offshore*, circundando a fácies areia biosiliciclástica, próximo à foz do rio Açu, apresentando forma de fundo menos desenvolvida (menos visíveis) que a fácies areia siliciclástica, embora com a mesma direção.

As areias bioclásticas ocorrem preferencialmente como uma faixa contínua após a areia biosiliciclástica, diferenciando-se da mesma apenas pela maior profundidade; ocorrem ainda após a foz do rio Açu. Já as areias bioclástica com grânulo e cascalhos concentram-se nas partes mais profundas entre as formas de

fundo.

O cascalho bioclástico ocorre preferencialmente em profundidades maiores de 25 m, acompanhando esta isóbatas. O cascalho siliciclástico e em menor proporção o cascalho bioclástico, ocorre na forma de bolsões em áreas mais rasas, onde o fundo submarine é plano. Neste ultimo caso poderiam estar associados a depósitos residuais formados por correntes de mare de alta velocidade (Vital *et al.*, 2005).

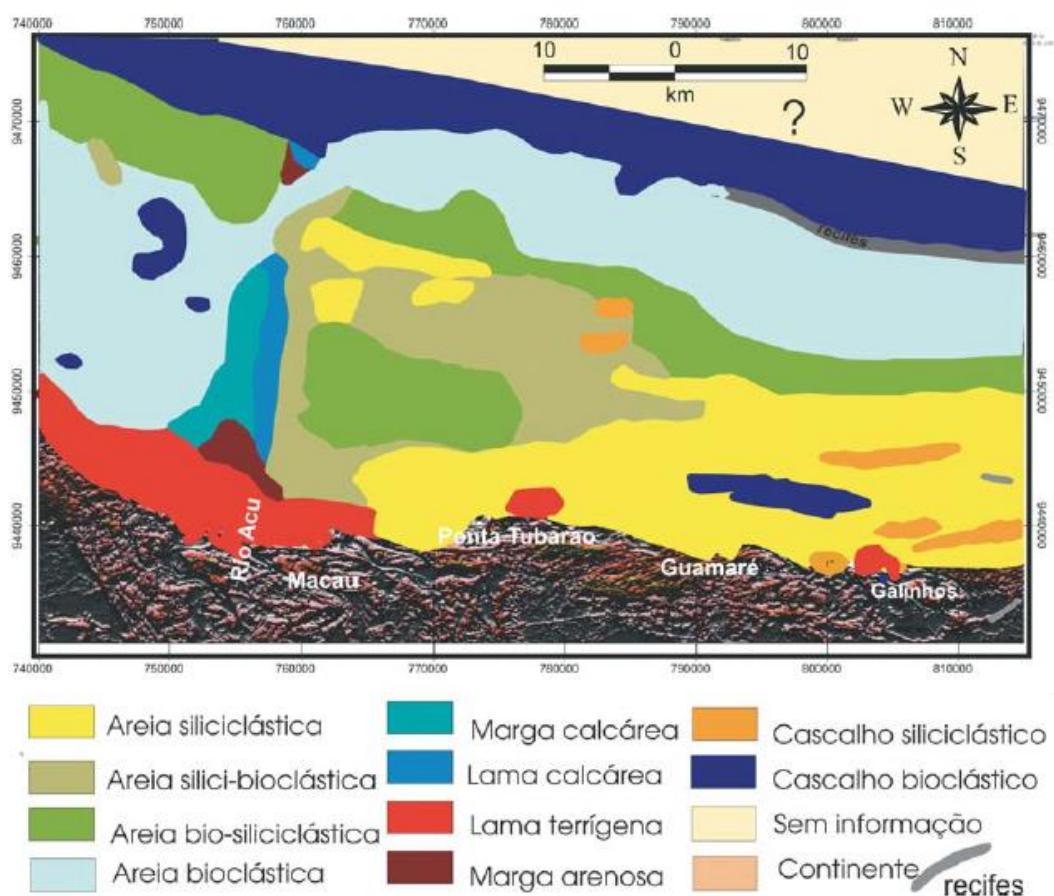


Figura 3.4 - Carta sedimentológica para a plataforma continental brasileira entre Galinhos e Macau (NE Brasil). Fonte: Vital *et al.* (2005).

CAPÍTULO 4

Materiais e Métodos

4.1 MATERIAL

Para fazer a análise dos interpoladores, foram usados três fontes de dados:

- Carta Náutica de Areia Branca a Guamaré de 31/05/2016, Código 720, proveniente do Centro de Hidrografia da Marinha (https://www.mar.mil.br/dhn/chm/box-cartas-raster/raster_disponiveis.html) (CN-720).
- Dados Petrobras/UFRN (GEMMA/GEOPRO) obtidos pela Petrobras em parceria com os Grupos de Pesquisa em Geologia e Geofísica Marinha e Monitoramento Ambiental (GEMMA) e o Laboratório de Geoprocessamento (GEOPRO), ambos da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).
- Imagem de Satélite Landsat-8 OLI/TIRS (1 junho de 2013) – Composição R4-G3-B2 e resolução de 30 m.

Na Figura 4.1 é apresentada a área de abrangência dos três dados, a CN-720 está contida na área rosa e na área azul, os dados Petrobras na parte rosa e a imagem de satélite na região azul rosa e verde (a parte cinza representa a região com valores de profundidade maiores que 50 m).

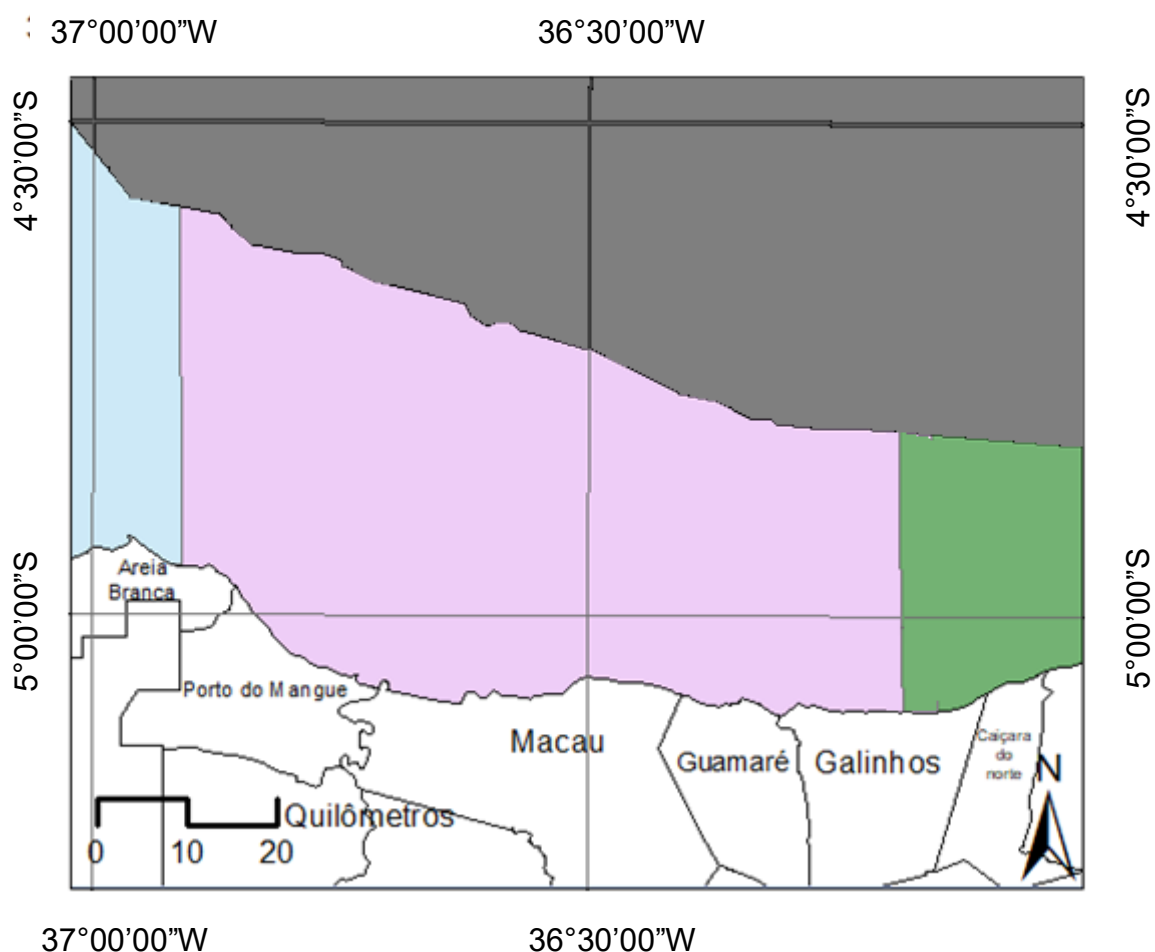


Figura 4.1 – Delimitações das áreas de abrangência de cada dado. Dados de CN-720 na parte azul e rosa, dados Petrobras, na região roxa e imagem de satélite nas áreas azul, roxa e verde.

4.1.1 Cartas Náuticas

Segundo o Centro de Hidrografia da Marinha (CHM), as cartas náuticas podem ser entendidas como documentos provenientes de levantamentos de áreas oceânicas, mares, baías, rios, canais, lagos, ou qualquer outra massa d'água navegável. Trata-se de uma ferramenta para navegação. São representações de acidentes terrestre e submarinos, fornecendo informações sobre profundidades, perigos à navegação e natureza do fundo, auxílios à navegação (faróis, faroletes, boias) altitudes, ponto notáveis aos navegantes, linha de costa e etc. Na Figura 4.2 visualiza-se a CN 720 onde cada ponto na imagem corresponde a um valor de profundidade. A área de plotagem desse mapa assim como os demais que

aparecerão nesse trabalho foi definida em função do tamanho da imagem de satélite da região. As cartas náuticas são disponibilizadas em formato digital de arquivos convencionais. Portanto, para poder trabalhar com elas é necessário efetuar o georreferenciamento e em seguida digitalizar sua nuvem de pontos no ArcMap. Dessa forma, gera-se um arquivo shapefile a partir da imagem da CN 720.

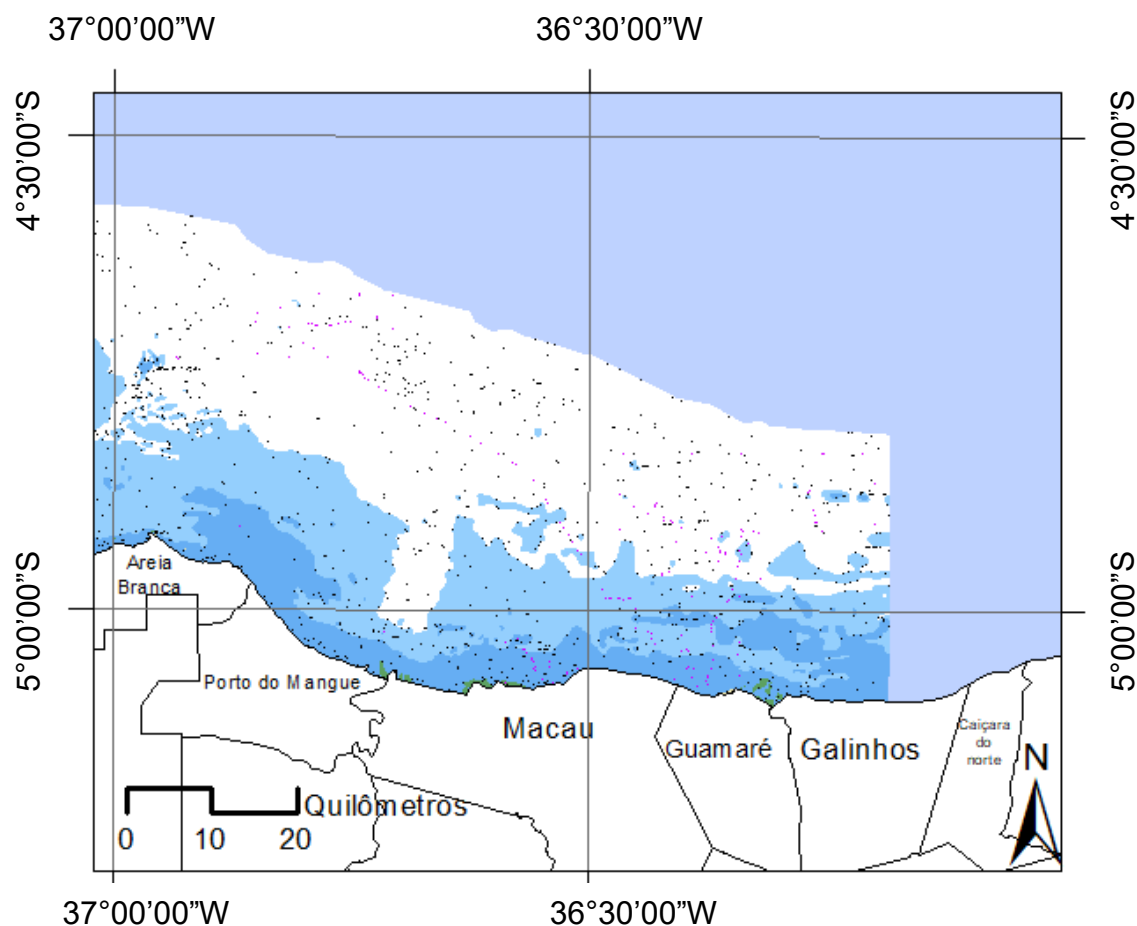


Figura 4.2 - Carta náutica de Areia Branca a Guimarães mostrando nuvem de pontos. Cada ponto na figura tem descrito sobre ele o valor da profundidade da coluna d'água naquele local. – Adaptado do Centro de Hidrografia da Marinha (https://www.mar.mil.br/dhn/chm/box-cartas-raster/raster_disponiveis.html). Carta de 31/05/2016, código:720.

A CN-720 foi georreferenciada e digitalizada para produzir um arquivo shapefile como é mostrado na Figura 4.3. Tendo cada ponto associado a um vetor, e cada vetor associado a uma valor de cota batimétrica, formando assim uma nuvem de pontos digitalizadas e georreferenciados. Os pontos estão dispostos de maneira irregular, mas fazendo uma série de medidas no ArcGIS encontra-se um distanciamento médio entre os pontos de 2000 m.

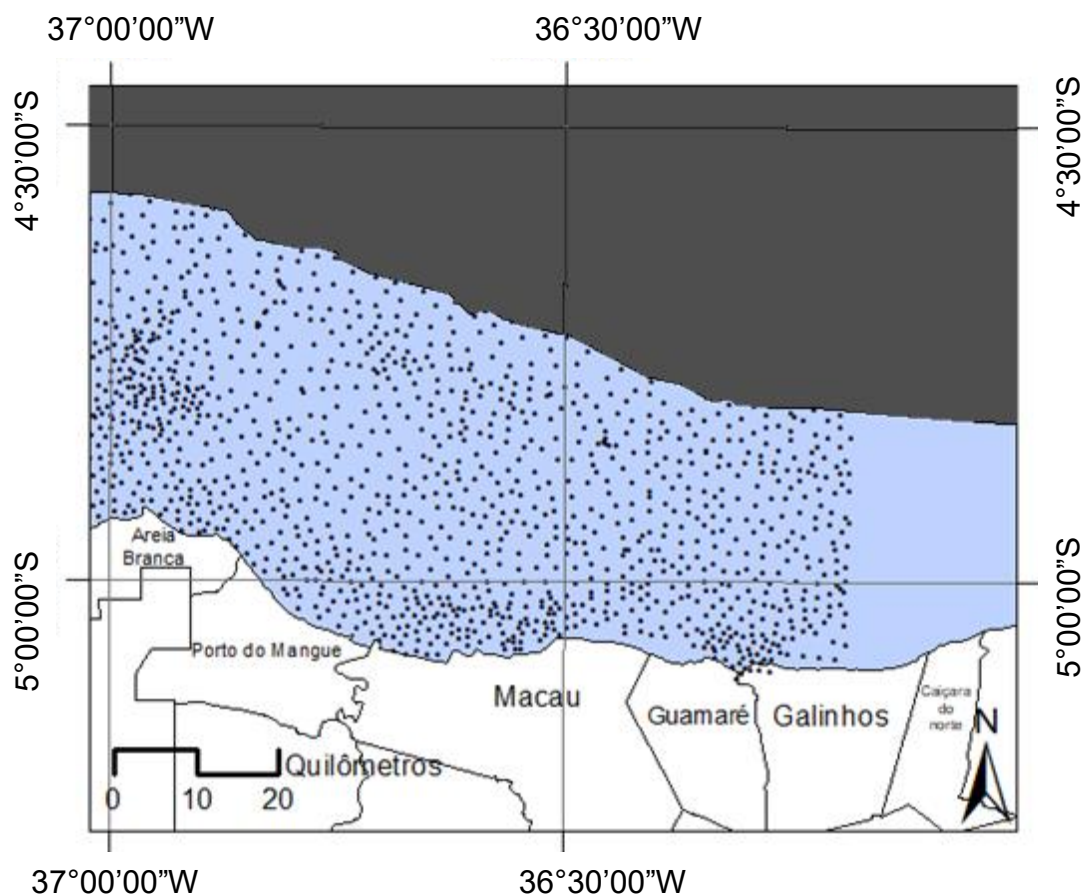


Figura 4.3 - Dados da CN 720 digitalizados. Nessa imagem cada ponto tem um valor de profundidade correspondente. Além do mais, como se trata de uma carta náutica digitalizada esses pontos são associados a um vetor de um arquivo Shapefile.

4.1.2 Petrobras/UFRN (GEMMA/GEOPRO)

A batimetria dos dados Petrobras/UFRN foi obtida por meio do levantamento *in loco* com uma embarcação equipada com um SONAR que mede a distância da superfície até o fundo. Para realizar essa medida, ele emite uma onda que se propaga até o fundo onde o sinal é refletido, retorna até o SONAR, e é medido o tempo de viagem do sinal. Com o tempo de viagem e conhecendo-se a velocidade de propagação determina-se a distância percorrida pela onda e consequentemente a profundidade da coluna d'água, conforme esquema na Figura 4.4. Foram georreferenciados em UTM no Datum horizontal WGS84, com profundidade em metros corrigidos a partir do nível médio dos mares.

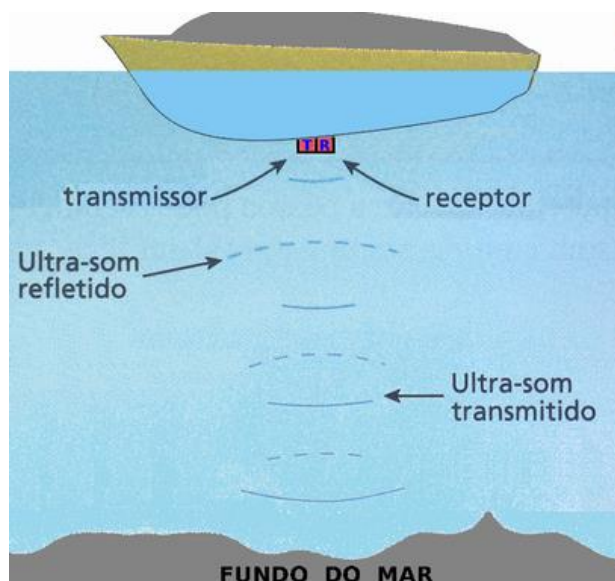


Figura 4.4 - Esquema de funcionamento de um sonar mostrando emissão da onda (ou ultra-som) pelo transmissor do ecobatímetro, reflexão no fundo do mar e recepção da onda refletida pelo aparelho.

Na Figura 4.5, os dados de batimetria Petrobras/UFRN têm uma disposição regular, mas com um distanciamento médio entre os pontos de 100 m no eixo S-N, enquanto que no eixo eixo W-E um distanciamento médio de 1000m.

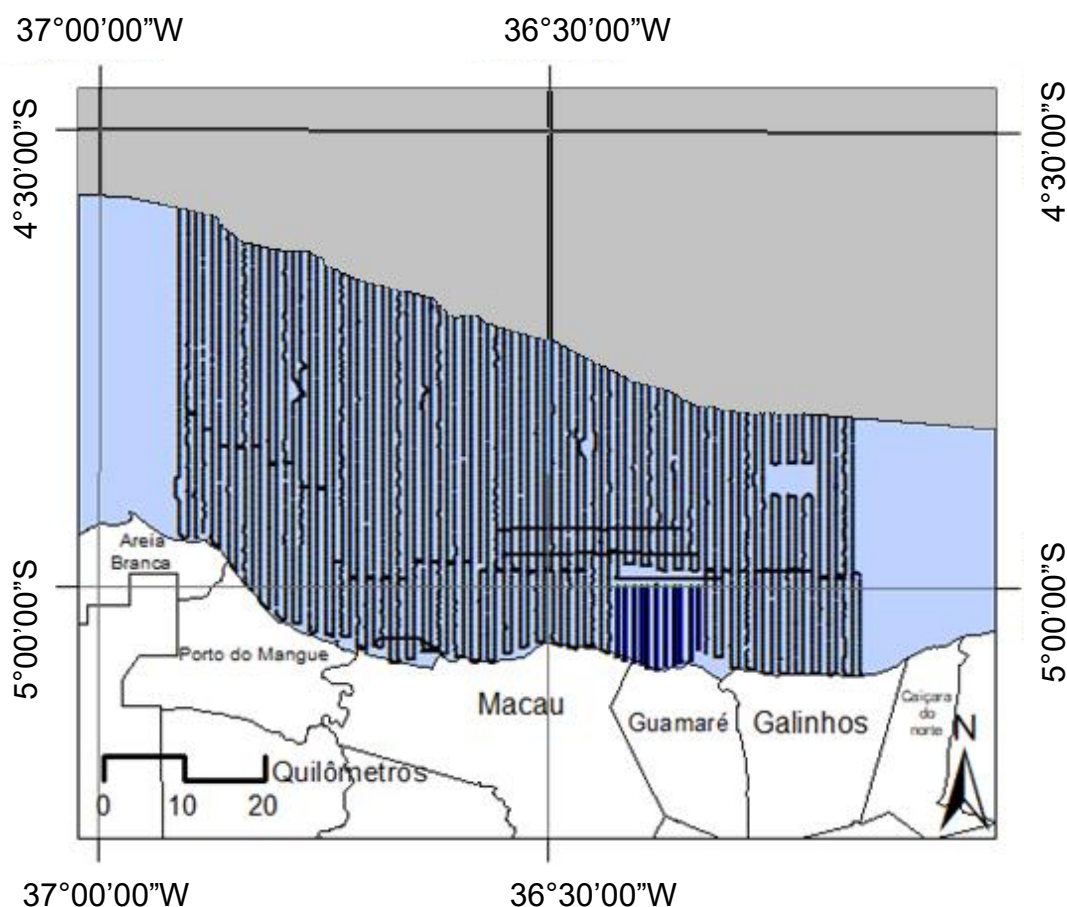


Figura 4.5 - Dados de Batimetria Petrobras/UFRN. Nessa imagem as linhas representam um conjunto adensado de pontos levantado usando ecobatímetro a bordo de uma embarcação. O distanciamento médio no eixo S-N entre os pontos é de 100 metros e o distanciamento médio no eixo W-E é de 1000 m.

4.1.3 Imagem de satélite

A Figura 4.6 mostra a imagem que foi usada para extração da batimetria. É uma imagem multispectral com resolução espacial de 30 m, ao extrair um valor de profundidade para este, esse valor estará no centro do mesmo, portanto a extração de batimetria por imagem de satélite gera uma malha regular com distanciamento médio no eixo S-N e no eixo W-E entre os pontos de 30 metros.

A imagem usada para extração da batimetria foi adquirida no site da United States Geological Survey (USGS) por ser disponibilizada gratuitamente e ter um alto grau de penetração. Foi escolhida uma imagem do Landsat 8 OLI/TIRS e resolução de 30 m. O critério de seleção foi que a imagem deveria ser a mais próxima possível do levantamento dos dados Petrobras/UFRN em 2004 e que deveria ter a

quantidade de nuvens inferior a 20%. Portanto, a imagem escolhida foi uma Landsat 8 OLI/TIRS de 01 de junho de 2013 às 12:36:30. Nesse dia a primeira baixamar (0,60 m) foi às 5:04, a preamar (2,20 m) às 11:36, a segunda baixamar (0,70 m) às 17:52 e a fase da lua foi minguante.

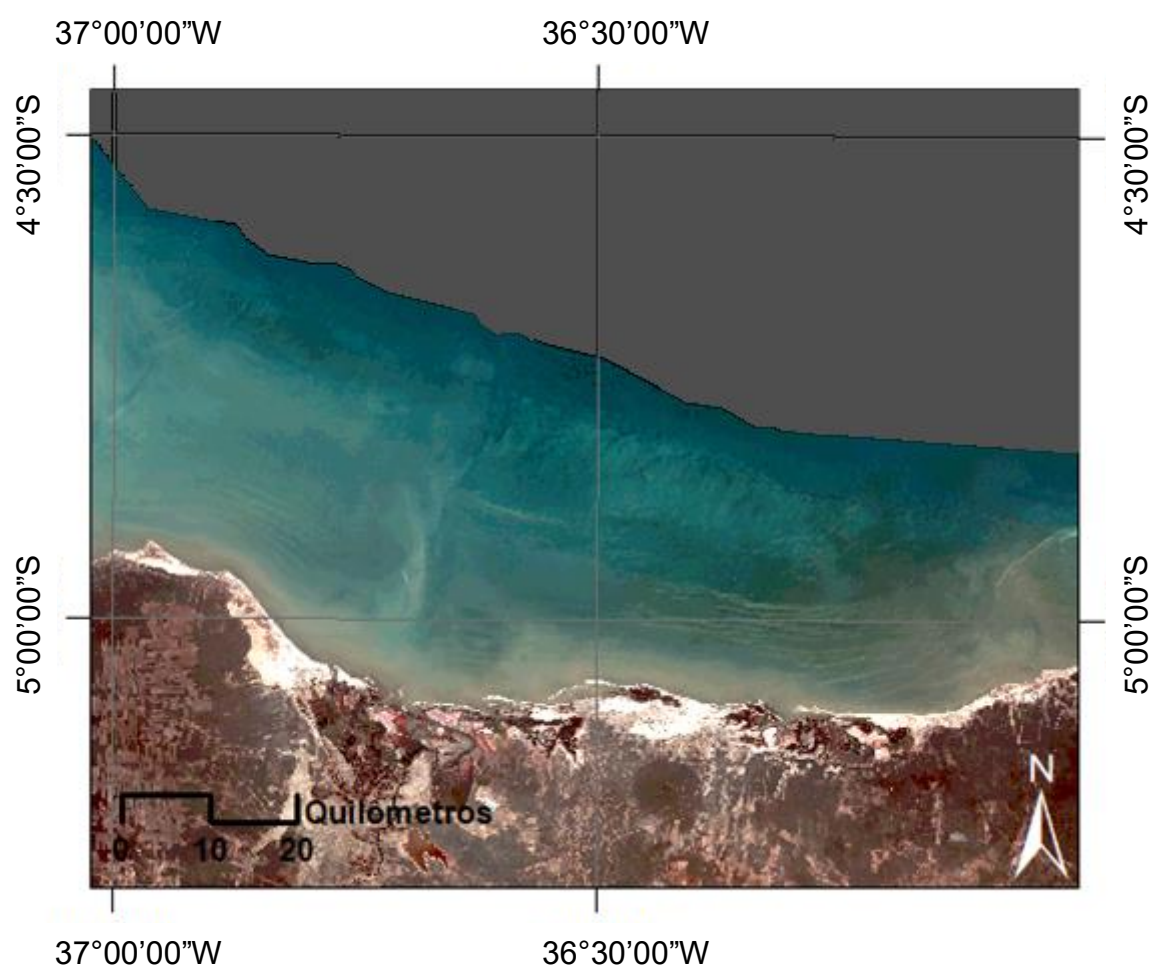


Figura 4.6 - Dados de Sensoriamento Remoto. Imagem Landsat-8 OLI/TIRS (1 junho de 2013, composição R4-G3-B2 e resolução de 30 m. Fonte: United States Geological Survey <https://earthexplorer.usgs.gov/>.

4.2 METODOLOGIA

Como já foi dito, os dados de batimetria por imagem de satélite, servirão como referência de avaliação da qualidade dos resultados gerados a partir da CN 720 e a partir da batimetria dos dados Petrobras/UFRN. Para poder fazer uma

comparação entre os resultados desses dados, o primeiro questionamento foi, como compararmos dados que são diferentes? Para responder essa pergunta foi necessário encontrar uma forma de compatibilizá-los da forma mais adequada. Uma vez os dados compatibilizados, estes agora poderiam ter seus resultados analisados.

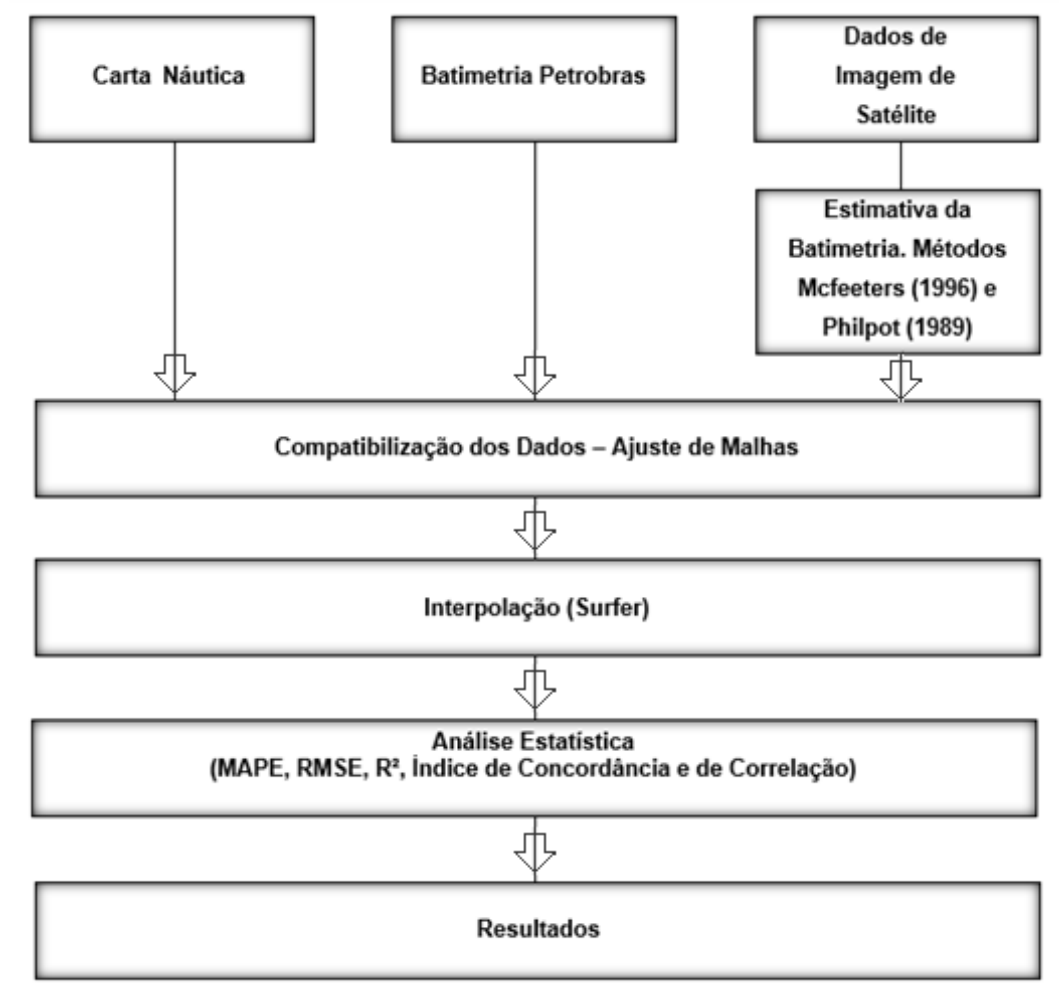


Figura 4.7 - Fluxograma da metodologia. No topo, os dados de entrada: “Carta Náutica”, “Batimetria Petrobras/UFRN” e “Dados de Imagem de Satélite”. Um nível abaixo Estimativa da Batimetria, seguido de Compatibilização dos Dados, Interpolação, Análise Estatística e Resultados.

4.2.1 Estimativa de Batimetria por Imagem de Satélite

Serão usados dois métodos de extração de batimetria por imagem de satélite. Aquele que apresentar o resultado mais apropriado será determinado como o método principal de estimativa de batimetria para esse trabalho. Essa análise será

feita de forma visual comparando com uma imagem Landsat 7 processada por Gomes (2007). Primeiramente o método Mcfeeters (1996) é baseado no cálculo do índice de diferença normalizada da água (normalized difference water index - NDWI) e em um segundo momento foi feita a estimativa pelo Philpot (1989), que é baseado na correlação entre o valor de radiância captada pelo sensor e a profundidade do ponto por meio de uma função exponencial. Mais detalhes desse processo serão melhor explicados a seguir.

Para se calcular a batimetria por imagem de satélite, uma série de procedimentos computacionais é necessário. Para realizar os procedimentos fez-se uso basicamente de três *softwares*: ArcGIS, Envi e Matlab.

Inicialmente é necessário gerar uma imagem que tenha em seus pixels o valor de radiância captado pelo sensor no lugar do valor do *digital number* - DN.

No método Mcfeeters (1996) esse cálculo é feito na própria rotina do Envi na etapa inicial da correção atmosférica, onde os dados de entrada na rotina são os valores de DN e os de saída são os valores de reflectância. Enquanto que no método Philpot (1989) a radiância é calculada por meio de uma operação de bandas usando a Equação 4.1 no próprio ENVI.

4.2.1.1 Método Mcfeeters (1996)

O dado que se tem no pixel de uma imagem de satélite são valores digitais de radiância captada pelo sensor. Porém para uso do método Mcfeeters foram usados valores de reflectância do oceano. Por isso, para encontrar o valor da reflectância a partir dos valores digitais de radiância é necessário fazer a compensação dos efeitos atmosféricos, mais conhecida como Correção Atmosférica. Segundo a companhia desenvolvedora do ENVI, a ERDAS, a correção atmosférica serve para compensar os efeitos atmosférico que podem interferir na qualidade da imagem. Esses efeitos incluem vapor d'água, oxigênio, dióxido de carbono, metano, ozônio, espalhamento de aerossol e outros efeitos adjacentes. Existem vários métodos de correção atmosférica e o que foi adotado foi a Calibração Radiométrica seguida da rotina FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes) por usar os algoritmos mais avançados do ENVI. Trata-se de

uma correção atmosférica realizada nas bandas do visível (banda 1, 2 3 e 4, no caso do Landsat 8), a partir de sua relação com a banda do infravermelho próximo (banda 5 do Landsat 8) e com as bandas do infravermelho de onda curta (banda 6 e banda 7).

No próprio processo de correção atmosférica, que é realizado no ENVI, foi gerado no final um arquivo com valores de reflectância associados a cada pixel.

O NDWI, segundo McFeeters (1996), faz uso do sinal nas regiões do infravermelho próximo (banda 5 do Landsat 8) e do verde (banda 3 do Landsat 8 OLI/TIRS) para realçar as feições na água. O NDWI pode ser representada pela Equação 4.1.

$$NDWI = \frac{\text{banda 5} - \text{banda 3}}{\text{banda 5} + \text{banda 3}} \quad \text{EQUAÇÃO 4.1}$$

Onde cada termo da expressão está associado ao valor de reflectância da banda correspondente. (Obs: bandas do LANDSAT – 8 OLI/TIRS)

Uma vez a área definida e o arquivo shapefile dos dados Petrobras/UFRN “recortado”, é adicionado à sua tabela de informações uma coluna com o valor de NDWI do pixel que se encontra embaixo de cada ponto. E uma série de correlações são feitas no MATLAB. Foram usados dois critérios para escolher qual correlação usar: o Índice de Correlação entre os dados (R^2) e a simplicidade da expressão para facilitar sua aplicação em seguida no *software* ENVI onde calcula-se o valor de profundidade para cada pixel.

Portanto, em resumo, o processo consiste primeiramente em converter os valores de DN em valores de radiância, fazer a correção atmosférica obtendo a reflectância de cada banda. Com a reflectância, calcular o NDWI associado ao pixel. A partir do valor de NDWI, criar uma correlação com os dados de profundidade do levantamento Petrobras/UFRN, ou seja, uma expressão da profundidade em função do NDWI. Usar essa expressão para calcular a profundidade para todos os pixels da região de interesse e em seguida gerar uma malha regular 30x30 m com valores de profundidade para cada pixel da região. Na Figura 4.8 é apresentado o resumo do processo.

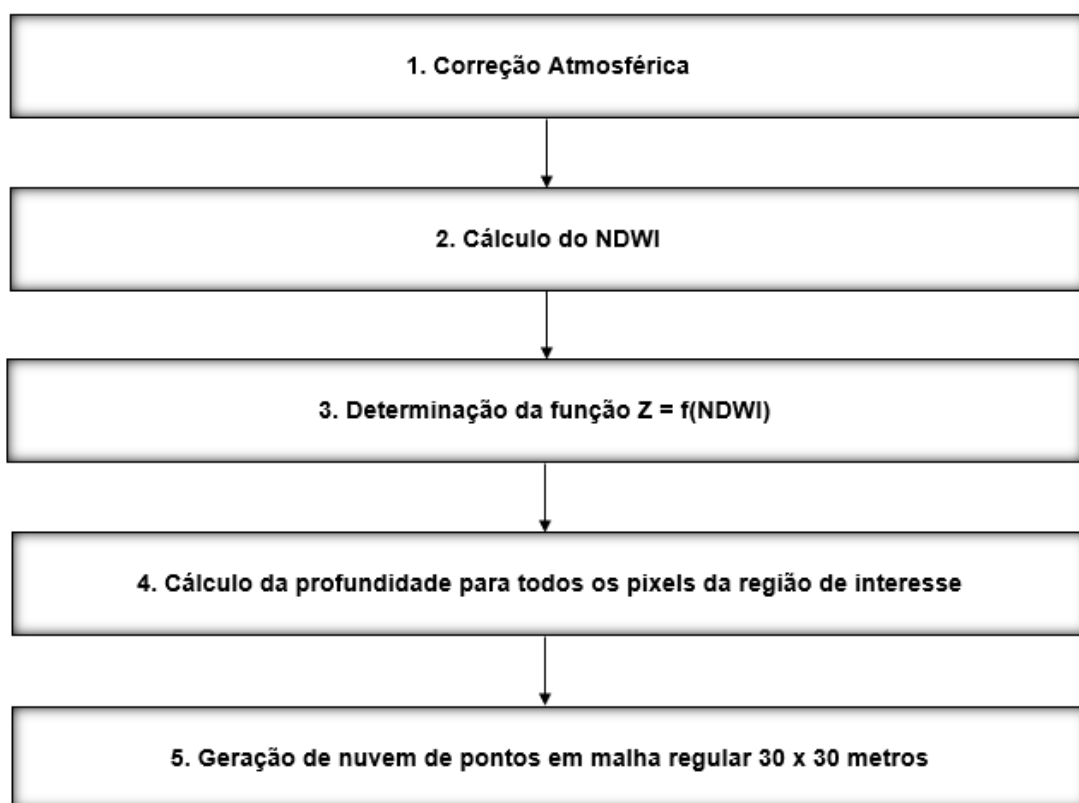


Figura 4.8 - Procedimento para Extração da Batimetria – Método Mcfeeters (1996).

Primeiramente é feita a eliminação de erros provocados pela atmosfera em “Correção Atmosférica”, em seguida o NDWI é calculado usando o sinal das bandas 5 e 3. Na etapa 3 é feita uma correlação entre a profundidade e o NDWI, gerando uma função de estimativa da profundidade. Então essa função é usada na etapa 4 para calcular a profundidade associados a todos os pixels da região de interesse e por fim na etapa 5 é gerada uma nuvem de pontos em uma malha regular de 30x30m.

4.2.1.2 Método Philpot (1989)

O método Philpot (1989) é baseado na ideia de que é possível correlacionar a radiância captada pelo sensor com a profundidade do alvo por meio da Equação 4.2:

$$L_{di} = L_b \exp(-gZ) + L_w \quad \text{EQUAÇÃO 4.2}$$

Onde “ L_{di} ” é a radiância observada pelo sensor na banda i ; “ g ” o coeficiente

de atenuação efetiva da água; “ z ” a profundidade da coluna d’água; “ L_b ” é a reflectância de fundo e “ L_w ” a radiância de fundo observada sobre água oticamente profunda (indicado na Figura 4.9).

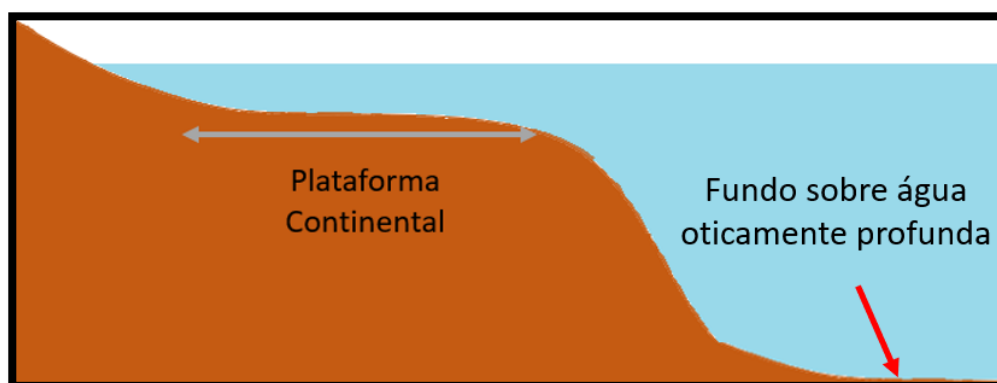


Figura 4.9 – Perfil da superfície da crosta terrestre, indicando o fundo sobre água oticamente profunda.

Nesse método a reflectância de fundo, “ L_b ” e o coeficiente de atenuação “ g ”, são considerados constante para toda a região do levantamento. O valor de radiância sobre água oticamente profunda, “ L_w ”, pode ser medido na própria imagem em uma região fora da plataforma continental.

Portanto o processo consiste em fazer o cálculo da radiância por meio da função *radiometric calibration* do ENVI, subtraí-los do valor “ L_w ”, obtendo $L_d - L_w$. Em seguida correlacionar $L_d - L_w$ com “ z ” por meio de um sistema de equações. Com isso tem-se todos os parâmetros da Equação 3.3 calculados. Isola-se o z encontrando a profundidade em função da radiância. Os mapas gerados e comparados visualmente com a imagem Landsat 7 processada por Gomes (2007) para escolher o melhor método.

4.2.2 Compatibilização dos Dados

A compatibilização é necessária para poder comparar os resultados, reduzindo a interferência da origem do dado no resultado final. A primeira etapa da compatibilização é a análise da regularização dos dados Petrobras/UFRN.

4.2.2.1 Análise da Regularização dos Dados PETROBRAS/UFRN

Os dados Petrobras/UFRN antes de serem interpolados, eles também são usados para calibrar a extração da batimetria por imagem de satélite. Como se trata de um dado de levantamento *in loco*, seu custo é diretamente proporcional ao número de pontos que se deseja levantar. Portanto com o objetivo de reduzir custos de levantamento e analisando uma quantidade mínima de pontos necessária para se fazer a calibração, foram produzidas diferentes formas de redistribuição dos dados Petrobras/UFRN. Os dados foram redistribuídos em um primeiro momento com uma quantidade reduzida de 75%, 50% e de 25%. Em seguida, estes foram usados para calibrar a imagem de satélite e gerar 3 mapas, cada um correspondente aos percentuais de 75%, 50% e de 25%.

A análise dos resultados dessas distribuições foi feita comparando o resultado com mapas gerados diretamente com imagem de satélite. Foram gerados perfis dos mapas feito com dados de imagem de satélite e com dados da batimetria Petrobras/UFRN. Os perfis dos mapas gerados foram comparados e em termos quantitativos, para esta análise foi usado os parâmetros estatísticos: MAPE, RMSE, Coeficiente de Correlação e Índice de Concordância.

4.2.2.2 Malha Padrão

Uma vez os dados Petrobras/UFRN regularizados, o processo continua com a definição de uma malha padrão, para a partir desta os três tipos de dados poderem ser comparados em relação aos mesmos pontos de referência.

Em um primeiro momento, a análise de regularização dos dados Petrobras/UFRN não foi feita. Porém, foi definida uma malha de referência para se obter alguns resultados. Para compatibilizá-los, foi necessário escolher um distanciamento médio padrão entre os pontos da nuvem. O distanciamento médio dos dados de CN-720 é de 2000 metros, o distanciamento médio dos dados de batimetria Petrobras/UFRN para geometria apresentada é de 777 metros e o distanciamento médio para os dados de imagem de satélite é de 36 metros. Fazendo uma média e uma aproximação para um número que fosse múltiplo das dimensões do pixel, definiu-se um distanciamento na direção S-N e na direção E-W

na malha padronizada de 990 metros. Para criar essa malha, foram realizados dois processos. O primeiro é para os dados de imagem de satélite, onde é feita uma média dos valores de profundidade dos pixels a cada quadrado de 990x990m. O segundo caminho, para os dados de batimetria da Petrobras/UFRN e de carta náutica, é por meio da interpolação, que gera como resultado um arquivo de malha (grid) no Surfer com o espaçamento definido de 990 metros.

Para analisar qual interpolador usar, são feitas análises estatística MAPE, RMSE, Coeficiente de Correlação, Índice de Concordância e Validação Cruzada que serão melhor explicados no final desse capítulo no tópico “Análise dos resultados”.

4.2.3 Interpolação

No final da compatibilização, portanto, foi feita uma malha regular padrão para os três tipos de dados. A partir dessa malha, foram realizadas as interpolações da CN-720 e dos dados Petrobras/UFRN. E seus resultados foram analisados por meio do MAPE, RMSE, Coeficiente de Correlação, Índice de Concordância e Validação Cruzada, conforme será explicado no próximo tópico.

Além das interpolações nos dados da CN-720 e nos dados da Petrobras/UFRN, também foram realizadas interpolações na batimetria extraída por Imagem de Satélite, mesmo que seus dados já estejam dispostos em forma de malha regular. Em seguida foi feita uma análise visual dos interpoladores usados nesses levantamentos batimétricos bem como uma análise da validação cruzada comparando o dado de entrada do interpolador com o dado de saída para ajudar a julgar qual o melhor interpolador.

4.2.4 Análise Estatística

Para poder verificar qual interpolador tem o melhor desempenho, serão analisados os resultados por meio do método da Validação Cruzada, MAPE, RMSE, Coeficiente de Correlação e Índice de Concordância.

4.2.4.1 Validação Cruzada

Segundo Moura (2010) validação cruzada é procedimento que consiste, basicamente, em comparar um conjunto de valores medidos com os respectivos valores estimados a partir de uma interpolação, contabilizando a diferença entre eles como sendo o erro de estimativa. A validação cruzada é uma forma de se avaliar a capacidade de generalização de um modelo. É uma ferramenta utilizada na avaliação de técnicas de predição.

Segundo o manual de usuário do Surfer (2012), a validação cruzada pode ser considerada uma forma de avaliar a qualidade de um método de interpolação e pode ser usada para todos os métodos do Surfer. Além disso, a validação cruzada também é uma ferramenta para escolher qual método de interpolação mais apropriado e seus resultados são úteis para avaliar a variação espacial da malha.

4.2.4.2. MAPE, RMSE, Coeficiente de Correlação e Índice de Concordância

Além da validação cruzada, é utilizado nesse trabalho como parâmetro de avaliação dos modelos, o erro percentual médio absoluto (MAPE), a raiz do erro médio quadrático (RMSE), o Coeficiente de Correlação (R^2) e o Índice de Concordância (d) definido por Willmott *et al.* (1985), que é um valor adimensional entre 0 e 1, que quanto mais próximo for de 1 maior concordância indicará entre os dados observados e os previstos, assim como o Coeficiente de Correlação (R^2). Suas expressões são representadas pelas equações 3.4, 3.5, 3.6 e 3.7.

$$MAPE = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^n \frac{|(O_i - P_i)|}{O_i} \quad (\text{EQUAÇÃO 4.3})$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \left(\frac{O_i - P_i}{O_i} \right)^2} \quad (\text{EQUAÇÃO 4.4})$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2)(\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2)}} \quad (\text{EQUAÇÃO 4.5})$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (\text{EQUAÇÃO 4.6})$$

Onde O e P são os valores observados e previsto, respectivamente, o que seria equivalente na validação cruzada aos valores de profundidade medido e estimados. Assim como na validação cruzada, estes quatro parâmetros serão usados tanto para avaliar o erro (que reflete na qualidade) do interpolador em relação aos seus dados de origens, usando o resultado da interpolação como profundidade estimada e os dados de entrada como valor medido. E posteriormente, usando o resultado da interpolação como profundidade estimada e o resultado da batimetria por sensoriamento remoto como valor de profundidade medido.

A validação cruzada, MAPE, RMSE, Coeficiente de Correlação e o Índice de Concordância serão usados para:

- Avaliar a qualidade do resultado gerado pelo interpolador no dado CN 720 usando como referência o próprio dado de origem.
- Avaliar a qualidade do resultado gerado pelo interpolador no dado Petrobras/UFRN usando como referência o próprio dado de origem.
- Avaliar a qualidade do resultado gerado pela regularização dos dados Petrobras/UFRN usando como referência o próprio dado de Imagem de Satélite.

Onde a profundidade estimada é o resultado do interpolador/regularização, e a profundidade medida são os dados de referência.

CAPÍTULO 5

Resultados e Discussão

5.1 APLICAÇÃO DO ÍNDICE DE DIFERENÇA NORMALIZADA DA ÁGUA (NDWI)

Após os dados de radiância digital do terreno terem sido transformados em dados de reflectância, o NDWI foi calculado para cada pixel e representado na Figura 5.1.

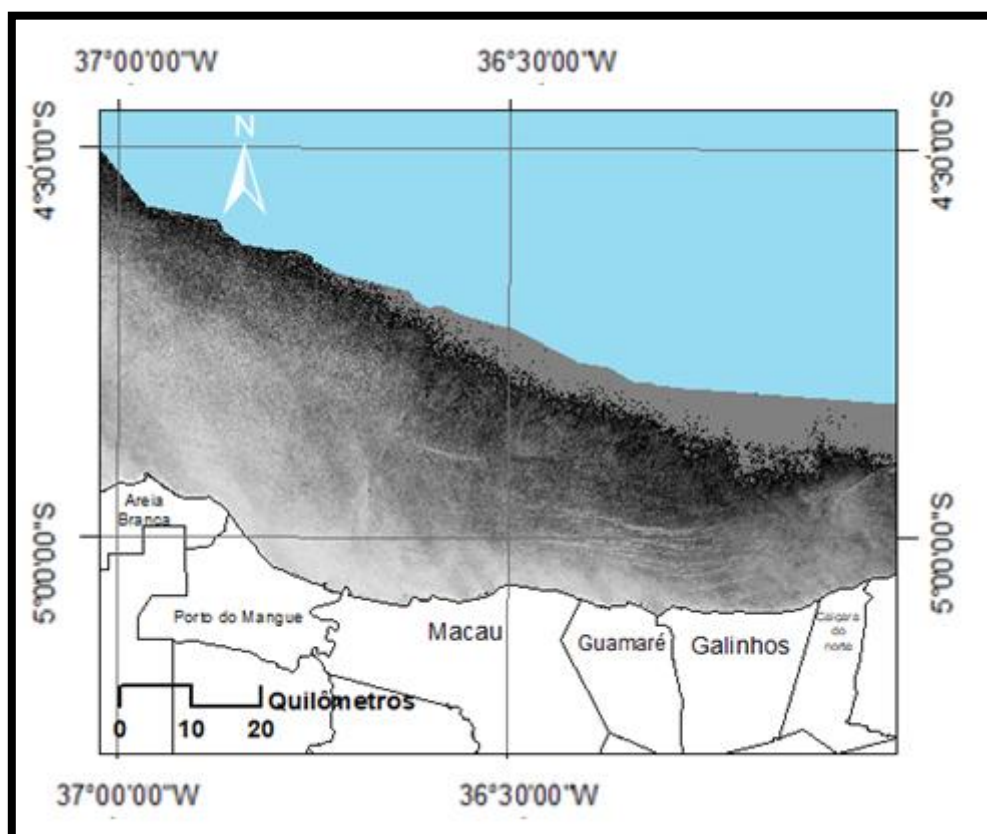


Figura 5.1 - Representação dos valores de NDWI em Preto e Branco. Nessa imagem a parte em Preto e Branco é a imagem de satélite, a parte laranja o continente representado em um arquivo *.shapefile* e a parte azul foi colocada para excluir uma região que não era necessária aparecer, ela coincide com a isóbata de 50 m da carta náutica. Na imagem de satélite, a imagem está representada por pixel em tons de cinza, associados ao valor do NDWI.

Na Figura 5.2 vê-se o resultado do NDWI em pseudocolor. Nela é possível visualizar de forma geral dois padrões de comportamento do índice NDWI, um padrão de variação mais nítido na região marinha com até 20 km de distância da costa e outro padrão mais constante para regiões mais distantes do que 20 km da costa.

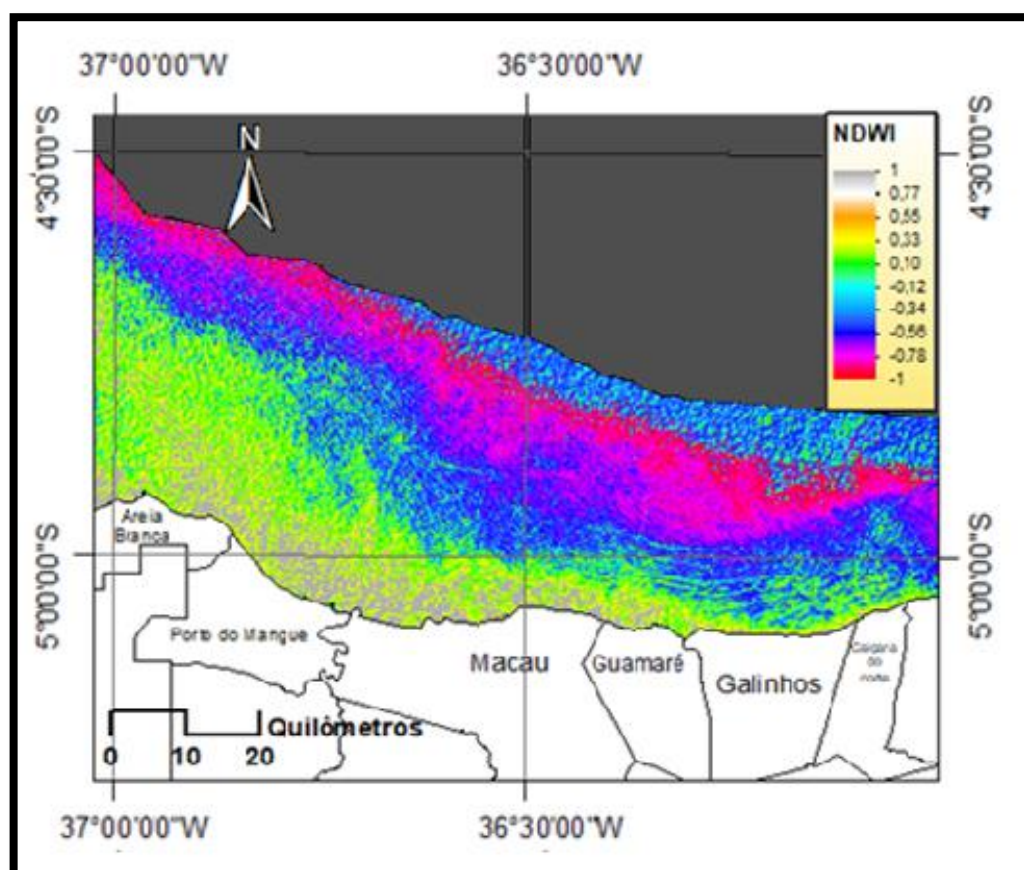


Figura 5.2 - NDWI em pseudocolor com efeito *hillshade*. Nessa imagem é apresentado o NDWI associado a uma escala de cores. O NDWI varia de -1 a 1 e cada valor dentro desse intervalo possui uma cor específica.

Sabe-se que nessa região a plataforma continental está aproximadamente a 20 km de distância da costa. Isso é uma evidência de que o padrão de comportamento irá ser totalmente diferente para os dados que estiverem em cima da plataforma e para aqueles que estiverem embaixo. Por isso, para fazer a correlação entre os dados Petrobras/UFRN e os dados de Imagem de Satélite no MATLAB, foi selecionado apenas os dados do levantamento Petrobras/UFRN que se encontravam sobre a

plataforma, formando a Região de Interesse - ROI (Region Of Interest), conforme representada na Figura 5.3.

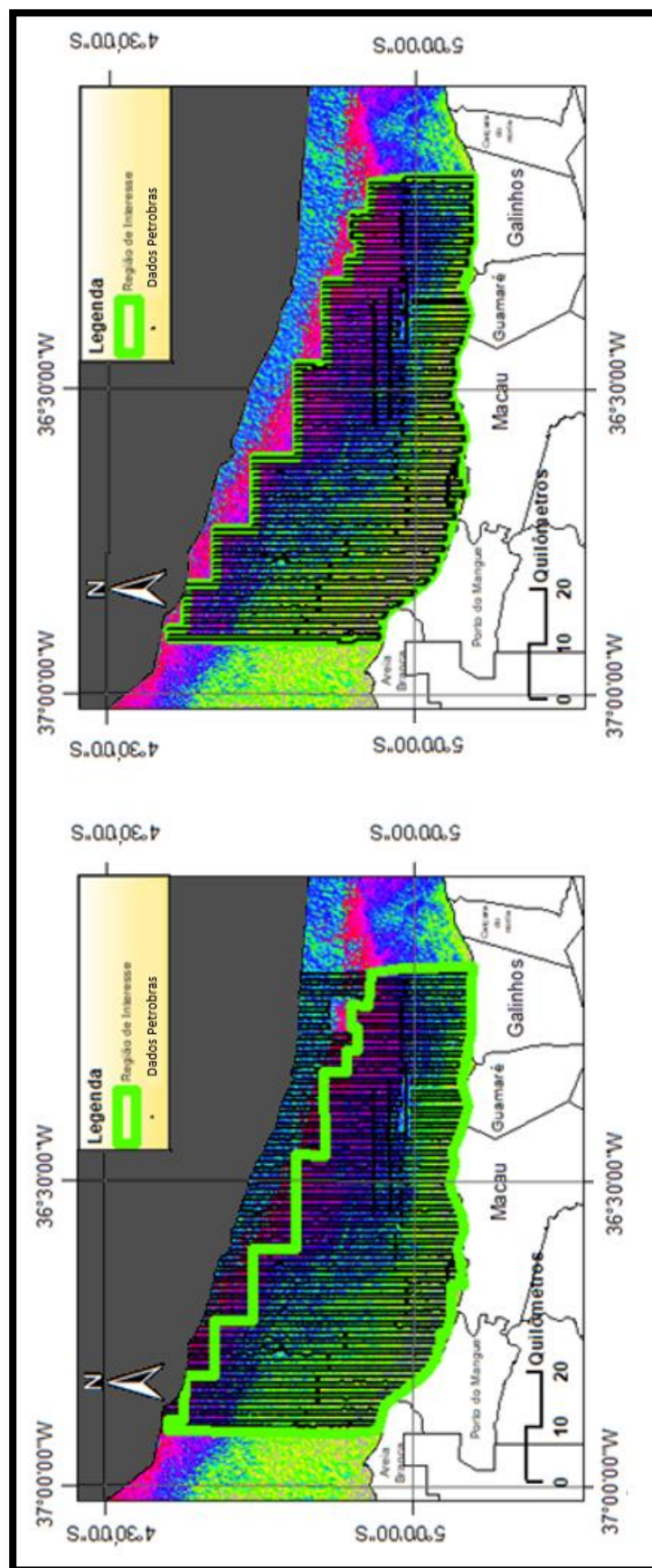


Figura 5.3 - (a) Disposição inicial dos dados Petrobras/UFRN e definição da ROI. (b) Interseção entre os dados Petrobras/UFRN e a ROI.

.A plotagem dos pontos no MATLAB, a função de correlação entre os pontos e sua respectiva expressão estão representadas na Figura 5.4. Com a função, calcula-se então o valor de profundidade para cada pixel da imagem por meio do ENVI.

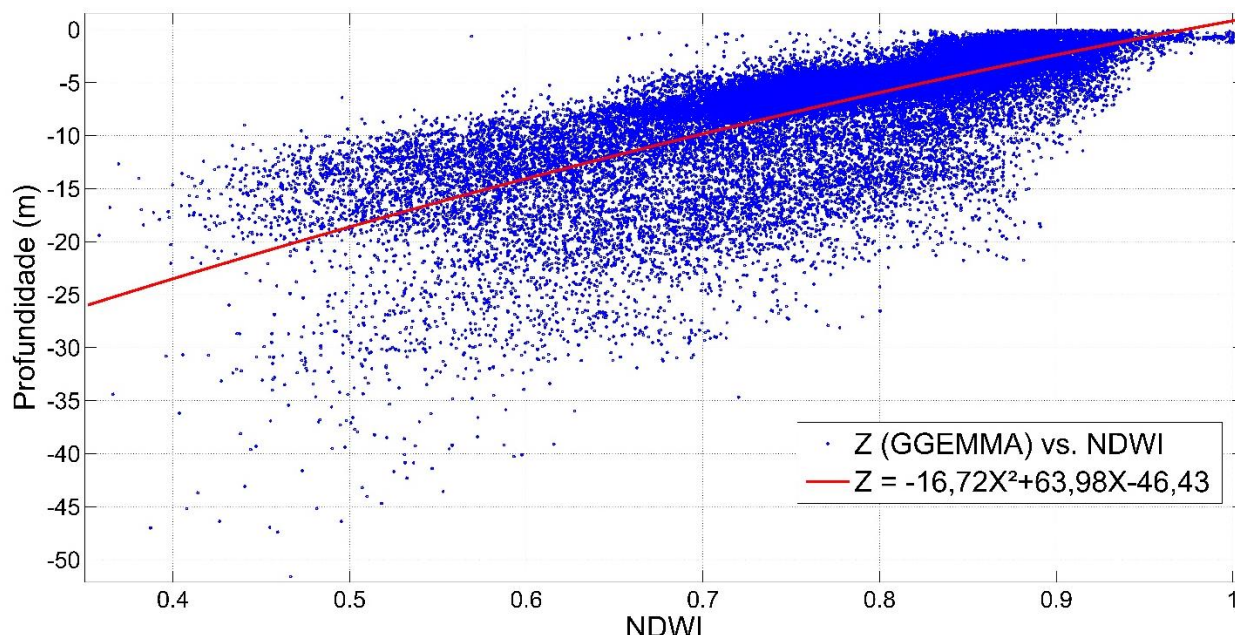


Figura 5.4 - Correlação Profundidade vs. NDWI. Nessa imagem tem-se no eixo vertical a profundidade e no eixo horizontal o NDWI. Como cada ponto do levantamento Petrobras/UFRN está associado a um valor de NDWI, pode-se plotar esse gráfico e montar uma curva de correlação em busca de uma função que melhor se enquadre os dados

5.2 MÉTODOS DE EXTRAÇÃO DE BATIMETRIA DE IMAGEM DE SATÉLITE

Usando o método Mcfeeters (1996) gerou-se o mapa batimétrico representado na Figura 5.5. e usando o método Philpot (1989), obteve-se o mapa batimétrico representado na Figura 5.6.

Comparando-se o método Mcfeeters (1996) da Figura 5.5, com a imagem processada por Gomes (2007) da Figura 5.6, percebe-se que esse método foi capaz de produzir uma boa delineação de muitas topologias marinhas que estão bem evidentes na imagem processada por Gomes (2007). É possível identificar os campos de dunas longitudinais em frente ao município de Guamaré, ao paleocanal do Rio Açu em frente à divisa dos municípios de porto do mangue e Macau em torno da latitude

de 05°00'00"S, as dunas subaquosas longitudinais à nordeste do município de areia branca, os recifes em frente ao município de Macau representado por uma linha amarela e em frente ao município de Caiçara do Norte os campos de dunas transversais aparentemente lisos são constatados também. Percebe-se também que a imagem gerou um valor de profundidade para todos os pixels.

Já o método Philpot (1989) produziu delineações ainda mais nítidas, porém o método não gerou valores de profundidade para regiões próxima à isóbata de 50 metros nem para as regiões em frente à Galinhos e à Guamaré, isso ocorreu porque não foi possível gerar resultado para pixels que possuísem valor de radiância inferior ao valor de radiância observada sobre água opticamente profunda, esse é um caso que a formula do método não é capaz de gerar solução e os pixels que não puderem ter um valor de profundidade calculado, ficaram com a cor branca. Verificou-se que esse era um problema que acontecia para todas as bandas da imagem. No resultado de Philpot (1989) não foi possível identificar o paleocanal do rio Açu, mas a imagem apresentou os campos de dunas longitudinais em frente ao município de Guamaré e Galinhos, em frente à Caiçara do Norte a região se apresentou relativamente lisa assim como na imagem processada por Gomes (2007) e em frente à Macau há uma linha vermelha que indica a presença dos recifes nessa região. Além disso, é possível verificar na região em frente à Caiçara do Norte uma elevação no relevo.

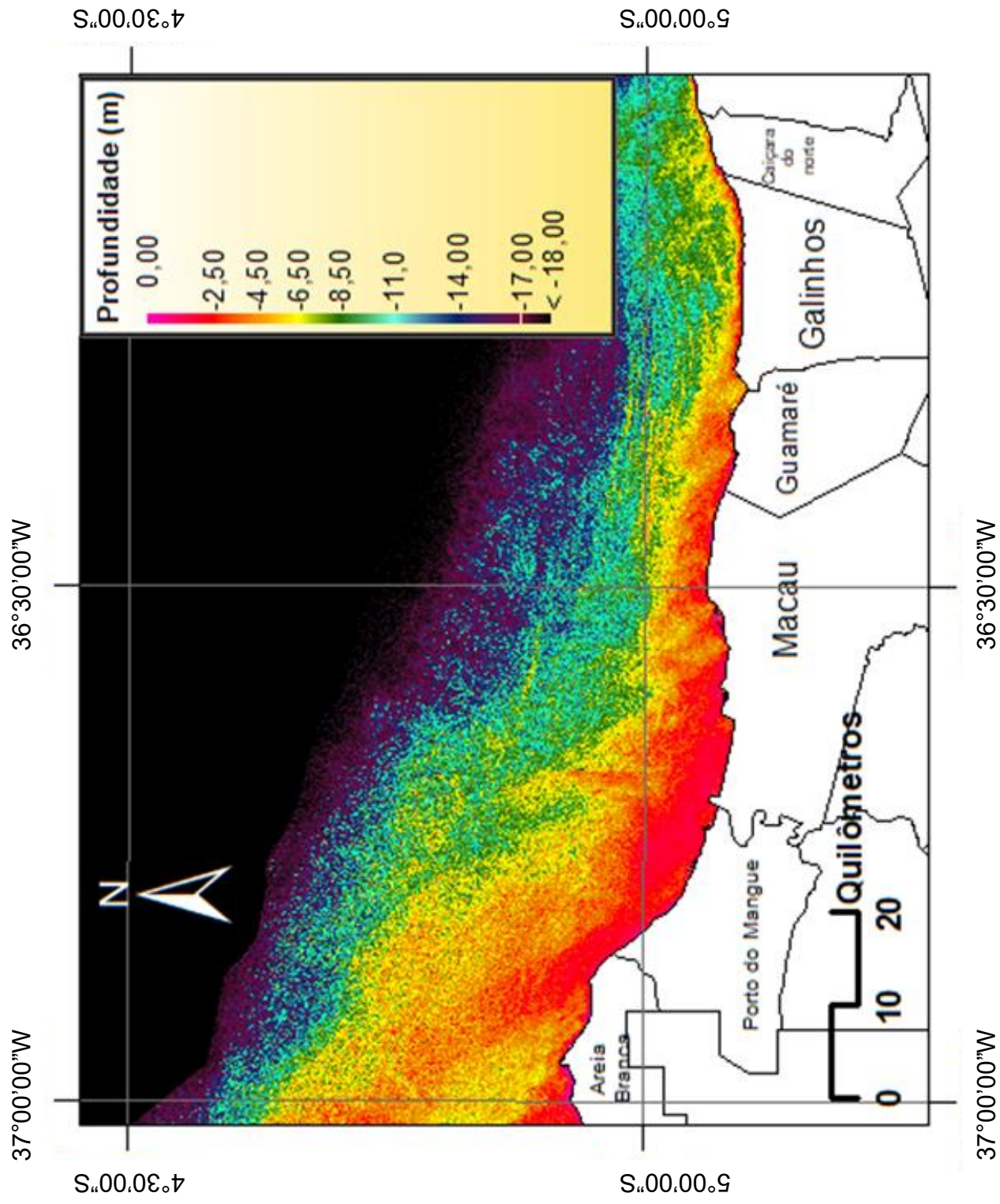


Figura 5.5 - Profundidade em pseudocolor pelo método Mcfeeters (1996). Nela cada cor está associada a uma profundidade. A escala no canto superior direito indica seus valores.

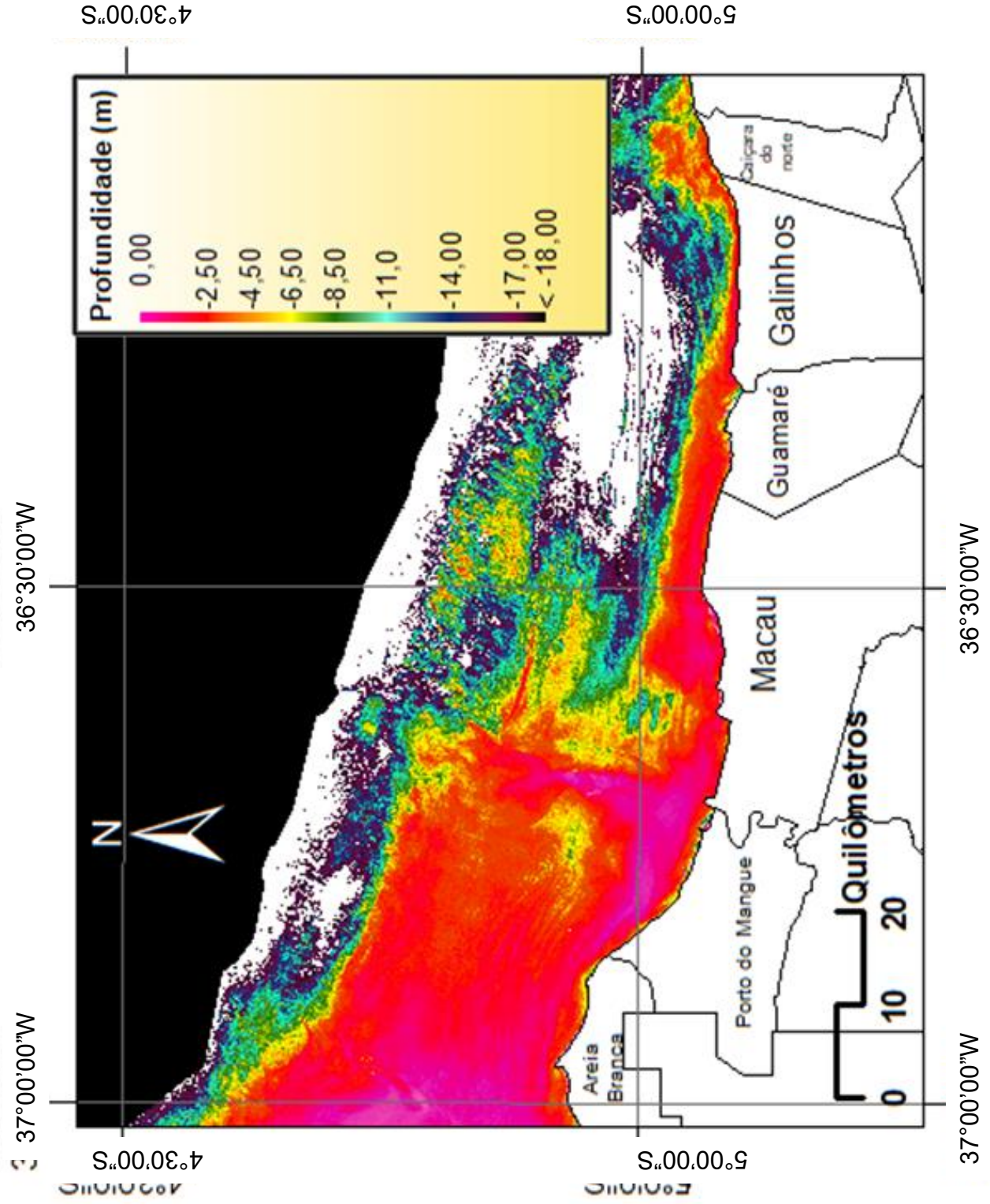


Figura 5.6 - Profundidade em pseudocolor. Nessa imagem é apresentado os valores de profundidade da região obtidos pelo método Philpot (1989). As partes em branco são regiões que não puderam ter o valor de profundidade calculado pelo método.

5.3 QUANTIDADE DE PONTOS DA BATIMETRIA PETROBRAS/UFRN:

Para verificar a quantidade mínima de pontos necessária no levantamento batimétrico Petrobras/UFRN, os dados tiveram uma redução na quantidade de pontos levantados, formando quatro pacotes de pontos com 25%, 50%, 75% e 100% da quantidade inicial. Dessa forma, montou-se 4 malhas interpoladas e nelas foram traçados os perfis para comparação com os perfis da imagem de satélite. Foram definidos três perfis, um perfil sobre a longitude $36^{\circ}54'27''\text{O}$, outro sobre a longitude $36^{\circ}36'47''\text{O}$ e outro sobre $36^{\circ}19'39''\text{O}$ conforme Figura 5.7. Os resultados são apresentados nas Figuras 5.8, 5.9 e 5.10.

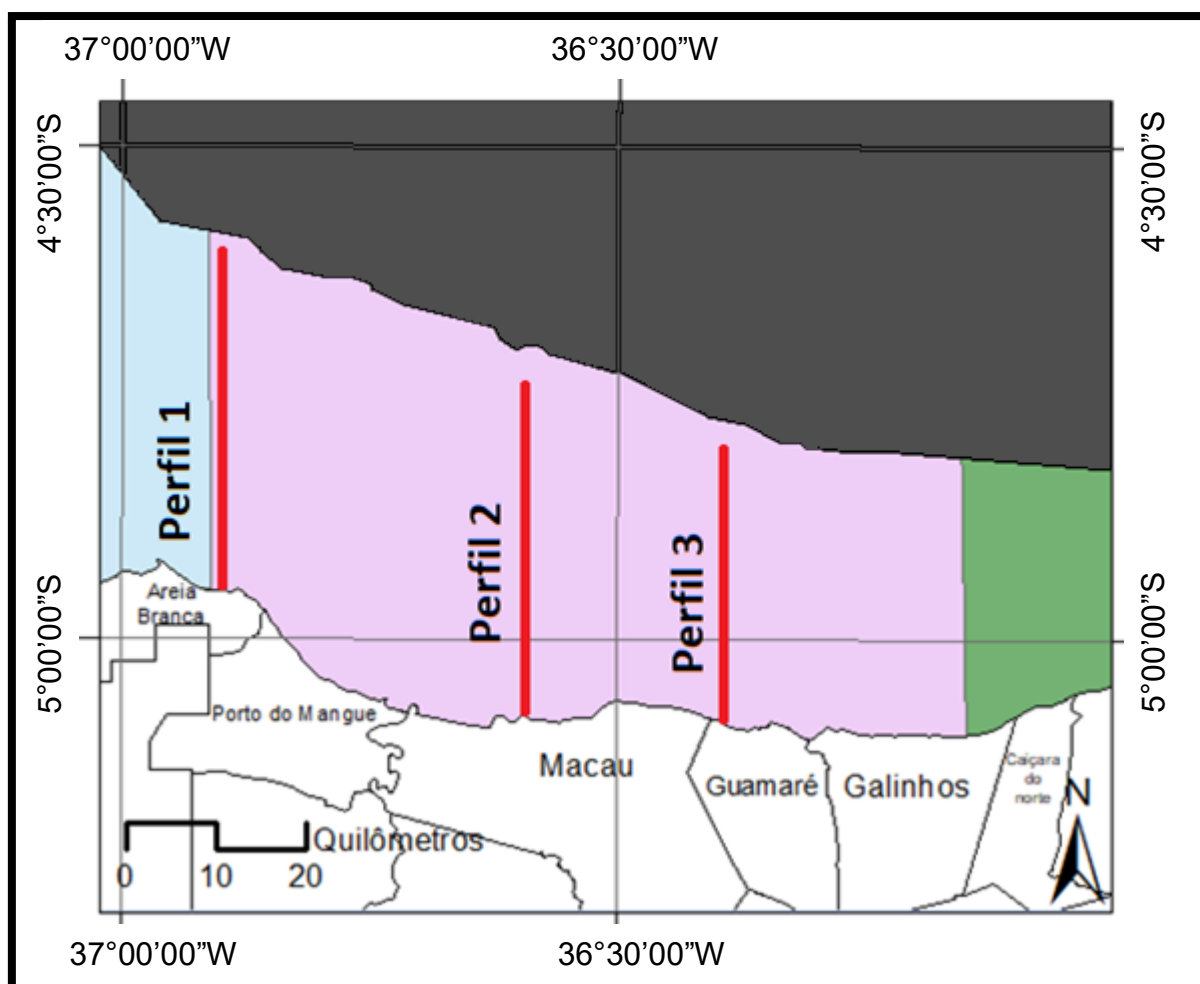


Figura 5.7 – Indicação dos perfis traçados. Perfil 1 sobre a longitude $36^{\circ}54'27''\text{O}$, Perfil 2 sobre a longitude $36^{\circ}36'47''\text{O}$ e Perfil 3 sobre a longitude $36^{\circ}19'39''\text{O}$.

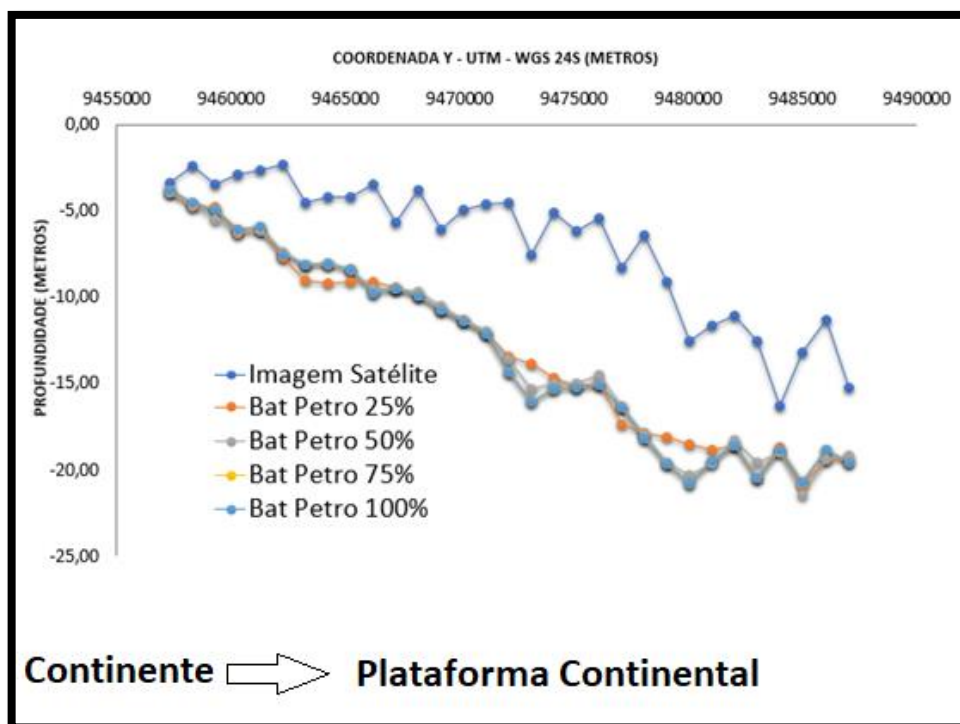


Figura 5.8 – Perfis gerados a partir dos dados levantamento batimétrico Petrobras/UFRN para 100%, 75%, 50% e 25% dos dados e Perfil gerado a partir de levantamento por imagem de satélite usando método Mcfeeters (1996) na longitude 36°54'27"O.

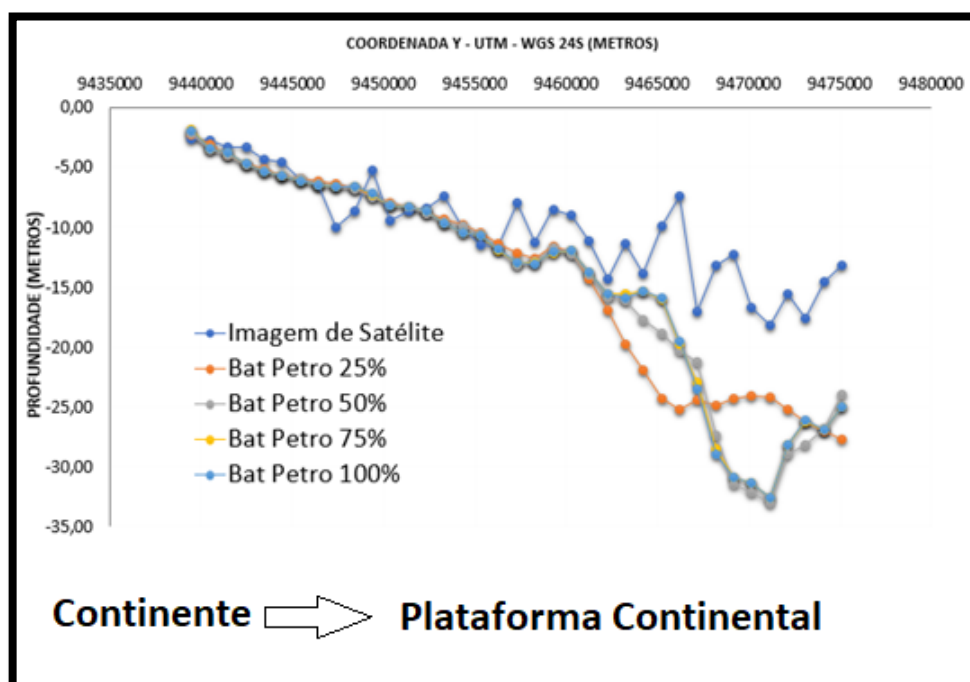


Figura 5.9 - Perfis gerados a partir dos dados levantamento batimétrico Petrobras/UFRN para 100%, 75%, 50% e 25% dos dados e Perfil gerado a partir de levantamento por imagem de satélite usando método Mcfeeters (1996) na longitude 36°36'47"O.

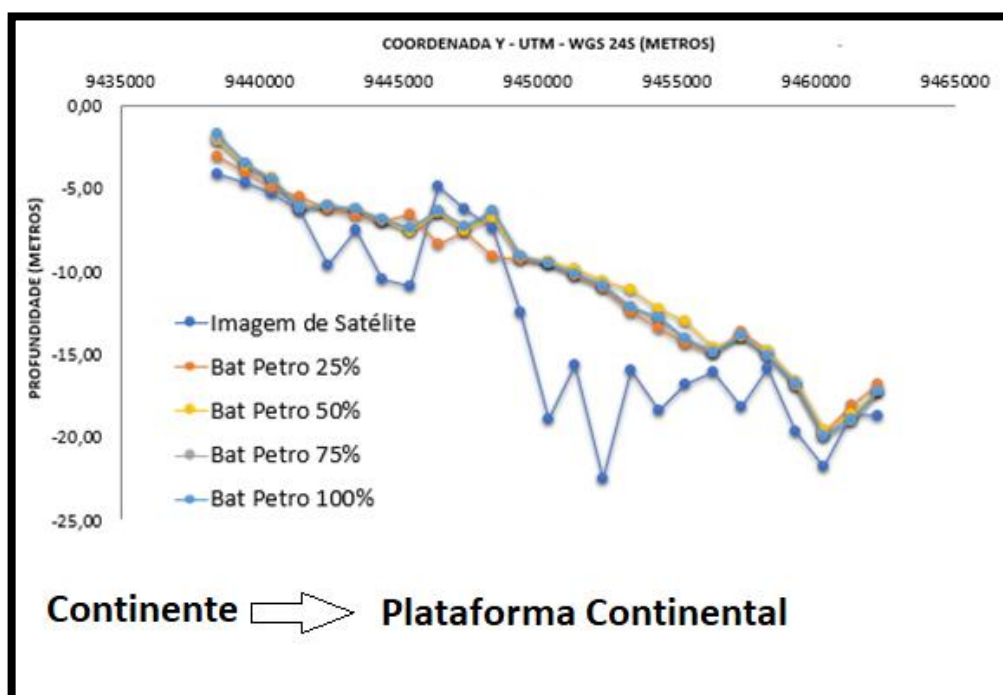


Figura 5.10 - Perfis gerados a partir dos dados levantamento batimétrico Petrobras/UFRN para 100%, 75%, 50% e 25% dos dados e Perfil gerado a partir de levantamento por imagem de satélite usando método Mcfeeters (1996) na longitude 36°19'39"O.

Os índices de correlação, de concordância, validação cruzada, MAPE e RMSE são apresentados na tabela 5.1. Quanto mais eficaz um método for, mais próximo será de 1 o valor do índice de correlação, do índice de concordância e da validação cruzada, assim como menor será o valor do módulo de MAPE e de RMSE.

Tabela 5.1 - Índice de Correlação (R^2), índice de concordância (d), Validação Cruzada, MAPE e RMSE para as batimetrias com 25%, 50%, 75% e 100% dos dados de batimetria in loco Petrobras/UFRN, nos perfis de longitude 36°54'27"O, 36°36'47"O e 36°19'39"O

PERFIL (LONGITUDE)	BATIMETRIA (%)	R^2	d	VALIDAÇÃO CRUZADA	MAPE(%)	RMSE
36°54'27"O	25	0,869	0,665	0,512	-107,045	1,207
	50	0,873	0,664	0,554	-106,441	1,193
	75	0,861	0,657	0,536	-107,587	1,219
	100	0,861	0,657	0,536	-107,587	1,219
36°36'47"O	25	0,824	0,726	0,673	-43,773	0,640
	50	0,852	0,717	0,702	-44,036	0,606
	75	0,853	0,726	0,704	-42,119	0,584
	100	0,854	0,726	0,706	-42,197	0,584
36°19'39"O	25	0,846	0,860	0,687	-23,782	0,289
	50	0,858	0,857	0,728	-24,110	0,282
	75	0,867	0,870	0,747	-23,390	0,275
	100	0,868	0,871	0,750	-23,518	0,279

Analisando-se os perfis da longitude 36°54'27" (Figura 5.8), percebe-se que os que foram gerados pela batimetria Petrobras/UFRN apresentaram um comportamento semelhante independentemente da quantidade pontos usados, já o perfil gerado pela imagem de satélite apresenta uma diferença sistemática em relação ao conjunto de pontos da batimetria Petrobras/UFRN. Nos perfis dessa coordenada também foram observados pequena variação no índice de correlação (máximo=0,012), no índice de concordância (máximo=0,008), na validação cruzada (máximo=0,042), no MAPE (máximo=1,146 %) e no RMSE (máximo=0,026).

Nos perfis da longitude 36°36'47" (Zona 24s) (Figura 5.9), os dados de batimetria Petrobras/UFRN apresentam grande semelhança com os dados de batimetria de Imagem de satélite até o ponto (9.465.000m) e partir daí começa a haver uma grande diferença entre os perfis. Nota-se que o perfil "Bat Petro – 25%" apresenta uma inconsistência em relação às demais batimetria Petrobras/UFRN. O índice de correlação apresenta variação máxima de 0,03, o índice de concordância, variação máxima de 0,009, a validação cruzada, variação máxima de 0,033, o MAPE, variação máxima de 1,917 % e o RMSE variação máxima de 0,056.

Nos perfis de longitude 36°19'39" (Zona 24s) (Figura 5.10), a batimetria por imagem de satélite apresenta-se próxima da batimetria Petrobras/UFRN no geral com exceção do trecho entre os pontos (796.320m, 9.450.000m) e (796.320m, 9.455.000m). Nota-se também que os dados de Batimetria Petrobras/UFRN são consistentes entre si. As variações máximas do índice de correlação, índice de concordância, validação cruzada, MAPE e RMSE foram respectivamente: 0,022, 0,014, 0,063 %, 0,72 e 0,014.

Em resumo percebe-se que não há grandes variações na qualidade do perfil em função da quantidade de pontos que é usada (25%, 50%, 75% ou 100%) nos perfis de longitude 36°54'27" e 36°19'39", enquanto que no perfil de longitude 36°36'47" a consistência dos perfis só é observada entre os perfis de batimetria de 50%, 75% e 100%.

5.4 ANÁLISE VISUAL DOS INTERPOLADORES

Para fazer a análise dos interpoladores nos dados de batimetria por imagem de satélite extraído pelo método Mcfeeters (1996), usou-se a imagem processada por Gomes (2007) como referência.

Os produtos gerados estão representados nas Figuras 5.11 a 5.13.

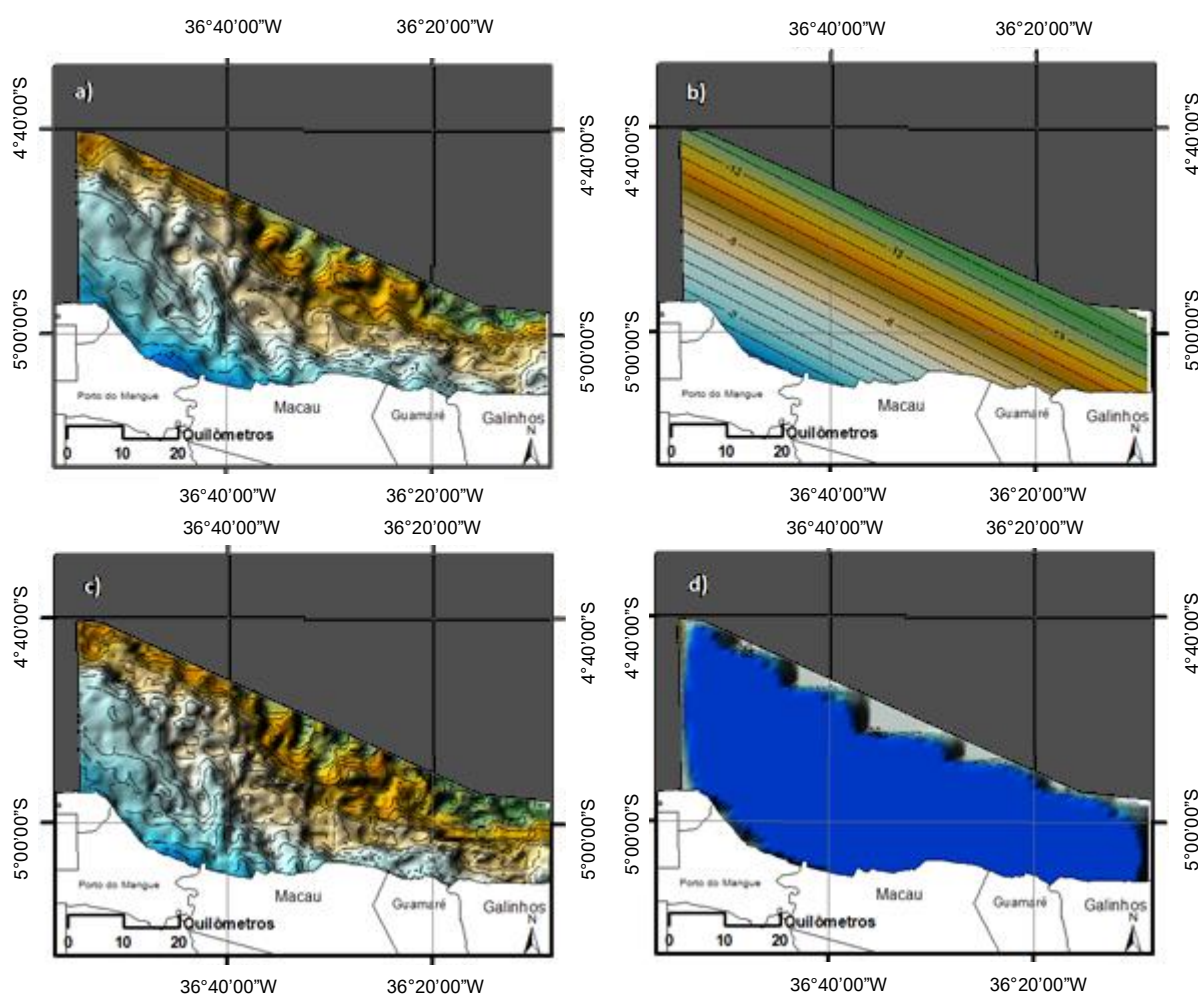


Figura 5.11 – Resultado da Interpolação dos dados de Batimetria de Imagem de satélite pelo método Mcfeeters (1996) usando como método: (a) Krigagem (b) Regressão Polinomial (c) Vizinho mais Próximo (d) Data Metrics.

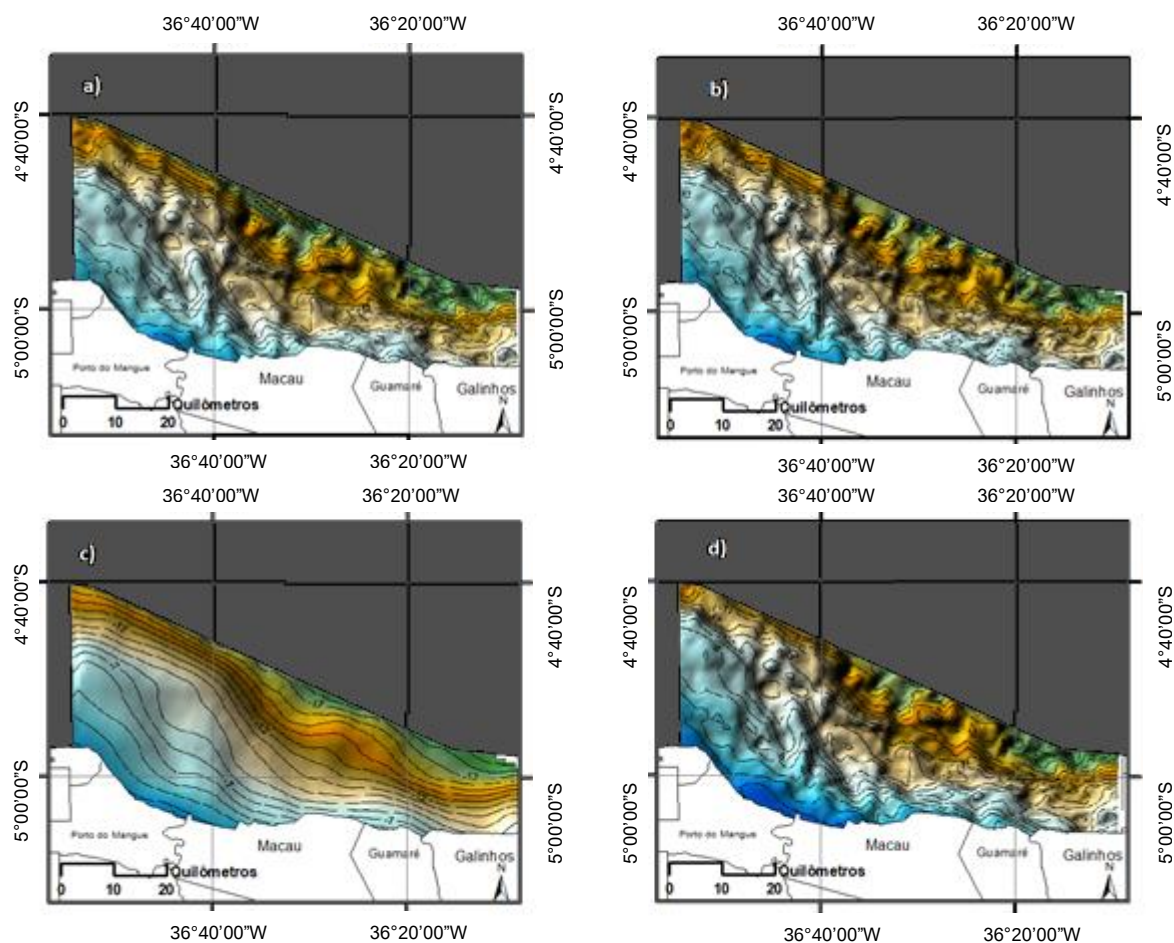


Figura 5.12 – Resultado da Interpolação dos dados de Batimetria de Imagem de satélite pelo método Mcfeeters (1996) usando como método: (a) Triangulação Com Interpolação Linear (b) Função de Base Radial (c) Polinômio Local (d) Vizinho Natural.

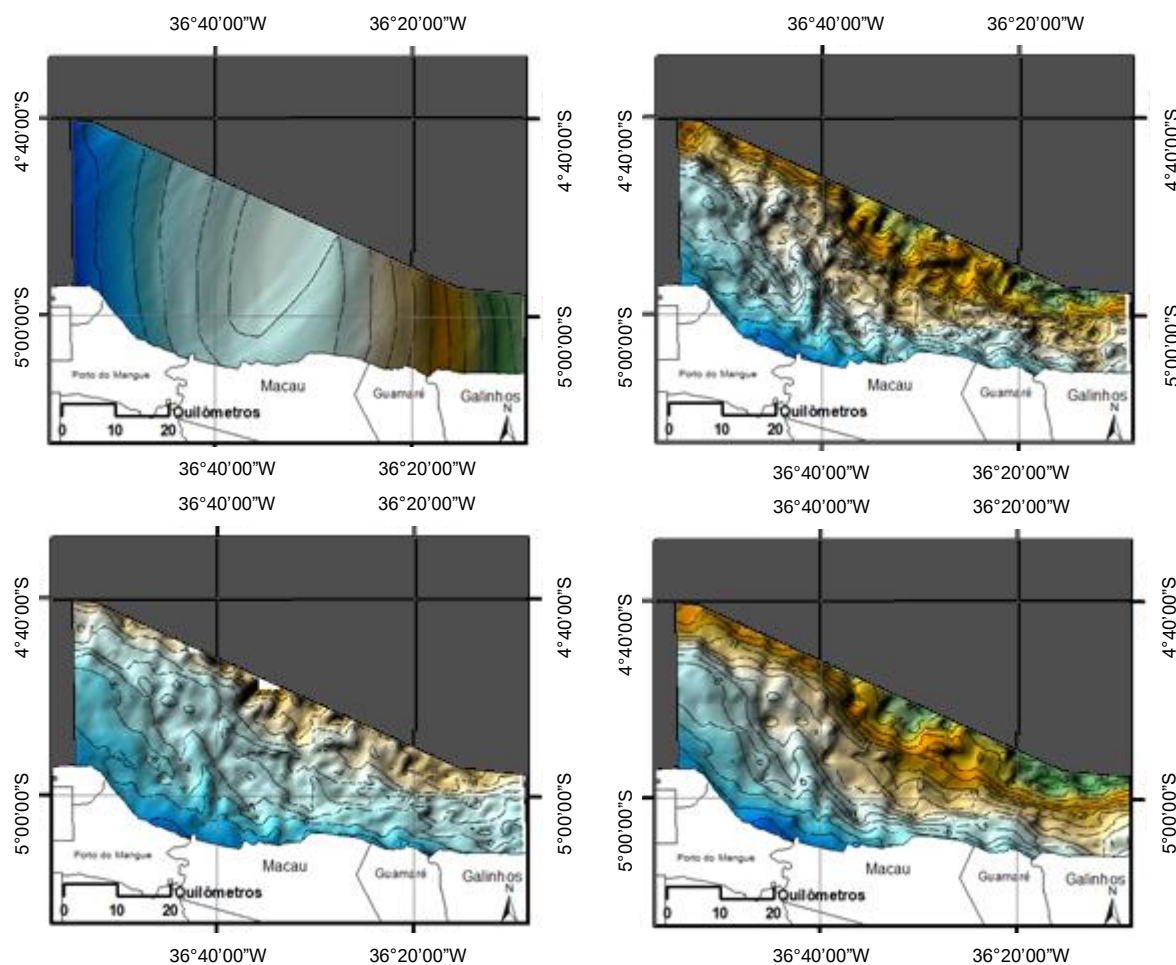


Figura 5.13 – Resultado da Interpolação dos dados de Batimetria de Imagem de satélite pelo método Mcfeeters (1996) usando como método: (a) Média Móvel (b) Curvatura Mínima (c) Shepard Modificado (d) Inverso da Potência das Distâncias.

Além dos mapas gerados, foi analisado o resultado da validação cruzada de cada interpolador, comparando os dados de entrada com os dados de saída conforme apresentado. O interpolador Métrica de Dados não foi capaz de gerar um valor de validação cruzada.

Tabela 5.2 - Valores de Validação Cruzada para cada Interpolador, comparando o próprio dado de origem com o dado de saída

Interpolador	Validação Cruzada
Krigagem	0,990
Método de Shepard Modificado	0,990
IPD	0,989
Vizinho Natural	0,988
Triangulação Com Interpolação Linear	0,984
Mínima Curvatura	0,983
Vizinho Mais Próximo	0,982
Função de Base Radial	0,980
Polinômio Local	0,977
Regressão Polinomial	0,930
Média Móvel	0,516
Métrica de Dados	-

Em uma primeira análise identifica-se que os métodos Data Metrics, Regressão Polinomial e Média Móvel apresentam resultados visuais discrepantes, sendo desde o início descartados.

Analisando os demais resultados, percebe-se um resultado visual relativamente parecido com exceção do método de Shepard Modificado que apresenta um padrão de cores (profundidade) diferente dos demais.

Se for observado a tabela 5.2 com os valores de validação cruzada desses dados, ver-se-á que os métodos: Shepard Modificado, Krigagem, Vizinho Natural e IDP (inverso da potência das distâncias) são os que apresentam os maiores valores de validação cruzada.

5.5 ANÁLISE QUANTITATIVA DOS INTERPOLADORES

Para fazer a análise quantitativa e comparativa da interpolação dos dados Petrobras/UFRN e Carta Náutica com os dados de batimetria por imagem de satélite foram geradas tabelas com valores de Coeficiente de correlação, índice de concordância, MAPE, RMSE e validação cruzada, para cada interpolação gerada para cada dado conforme *Tabela 5.3 - Valores de coeficiente de correlação, índice*

concordância, MAPE, RMSE e Validação cruzada para cada interpolador, para cada dado. Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Valores de coeficiente de correlação, índice concordância, MAPE, RMSE e Validação cruzada para cada interpolador, para cada dado.

DADOS	INTERPOLADOR	R ²	d	MAPE (%)	RMSE	VALIDAÇÃO CRUZADA
PETROBRAS/UFRN	Vizinho Natural	0,609	0,730	-59,569	8,131	0,239
	Krigagem	0,608	0,729	-59,548	8,194	0,240
	Triang. Int. Linear	0,610	0,731	-59,534	8,170	0,243
	Inverso da Distância	0,612	0,733	-59,268	8,226	0,239
	Vizinho mais Próximo	0,610	0,730	-59,286	8,234	0,249
	Mínima Curvatura	0,610	0,732	-59,202	8,224	0,242
	Função Base Radial	0,340	0,427	-86,698	18,676	0,091
	Polinômio Local	0,614	0,733	-59,131	7,981	0,246
	Regressão Polinomial	0,577	0,729	-59,237	8,606	0,194
	Média Móvel	N/D	0,374	-73,858	13,117	N/D
	Métrica de Dados	0,137	0,101	-1160,157	135,119	N/D
	Shepard Modificado	0,059	0,000	- 74746,897	18555,04 9	0,003
CARTA NÁUTICA	Vizinho Natural	0,584	0,747	-54,252	7,859	0,189
	Krigagem	0,582	0,748	-54,356	8,004	0,174
	Triang. Int. Linear	0,583	0,747	-54,336	7,842	0,188
	Inverso da Distância	0,545	0,694	-56,250	8,127	0,210
	Vizinho mais Próximo	0,573	0,739	-54,929	8,170	0,178
	Mínima Curvatura	0,494	0,683	-70,141	10,295	0,142
	Função Base Radial	0,577	0,744	-54,952	8,101	0,178
	Polinômio Local	0,423	0,438	-63,650	9,891	0,175
	Regressão Polinomial	0,573	0,739	-54,929	8,170	0,178
	Média Móvel	0,562	0,099	-1305,695	152,482	N/D
	Métrica de Dados	N/D	0,099	-1124,731	128,850	N/D
	Shepard Modificado	0,574	0,739	-55,980	8,340	0,185

Em seguida a tabela foi reorganizada de forma a classificar os 4 melhores interpoladores para cada dado em função de cada parâmetro calculado, conforme tabelas 5.4 a 5.8.

Tabela 5.4 - Valores de coeficiente de correlação, índice concordância, MAPE, RMSE e Validação cruzada para cada interpolador, ordenados de acordo com os maiores valores de índice de correlação

RANKING R ²						
DADOS	INTERPOLADOR	R ²	d	MAPE (%)	RMSE	VALIDAÇÃO CRUZADA
PETROBRAS/UFRN	Polinômio Local	0,614	0,733	-59,131	7,981	0,246
	Inverso da Distância	0,612	0,733	-59,268	8,226	0,239
	Vizinho mais Próximo	0,610	0,730	-59,286	8,234	0,249
	Mínima Curvatura	0,610	0,732	-59,202	8,224	0,242
	Triang. Interp. Linear	0,610	0,731	-59,534	8,170	0,243
	Vizinho Natural	0,609	0,730	-59,569	8,131	0,239
	Krigagem	0,608	0,729	-59,548	8,194	0,240
	Regressão Polinomial	0,577	0,729	-59,237	8,606	0,194
	Função Base Radial	0,340	0,427	-86,698	18,676	0,091
	Métrica de Dados	0,137	0,101	-1160,157	135,119	N/D
	Média Móvel	N/D	0,374	-73,858	13,117	N/D
	Shepard Modificado	0,059	0,000	-74746,897	18555,049	0,003
	Vizinho Natural	0,584	0,747	-54,252	7,859	0,189
CARTA NÁUTICA	Triang. Interp. Linear	0,583	0,747	-54,336	7,842	0,188
	Krigagem	0,582	0,748	-54,356	8,004	0,174
	Função Base Radial	0,577	0,744	-54,952	8,101	0,178
	Shepard Modificado	0,574	0,739	-55,980	8,340	0,185
	Regressão Polinomial	0,573	0,739	-54,929	8,170	0,178
	Vizinho mais Próximo	0,573	0,739	-54,929	8,170	0,178
	Média Móvel	0,562	0,099	-1305,695	152,482	N/D
	Inverso da Distância	0,545	0,694	-56,250	8,127	0,210
	Mínima Curvatura	0,494	0,683	-70,141	10,295	0,142
	Polinômio Local	0,423	0,438	-63,650	9,891	0,175
	Métrica de Dados	N/D	0,099	-1124,731	128,850	N/D

Tabela 5.5 - Valores de coeficiente de correlação, índice concordância, MAPE, RMSE e Validação cruzada para cada interpolador, ordenados de acordo com os maiores valores de índice de concordância.

Ranking Índice de Concordância						
DADOS	INTERPOLADOR	R ²	d	MAPE (%)	RMSE	VALIDAÇÃO CRUZADA
PETROBRAS/UFRN	Polinômio Local	0,614	0,733	-59,131	7,981	0,246
	Inverso da Distância	0,612	0,733	-59,268	8,226	0,239
	Mínima Curvatura	0,610	0,732	-59,202	8,224	0,242
	Triang. Interp. Linear	0,610	0,731	-59,534	8,170	0,243
	Vizinho mais Próximo	0,610	0,730	-59,286	8,234	0,249
	Vizinho Natural	0,609	0,730	-59,569	8,131	0,239
	Krigagem	0,608	0,729	-59,548	8,194	0,240
	Regressão Polinomial	0,577	0,729	-59,237	8,606	0,194
	Função Base Radial	0,340	0,427	-86,698	18,676	0,091
	Média Móvel	N/D	0,374	-73,858	13,117	N/D
	Métrica de Dados	0,137	0,101	-1160,157	135,119	N/D
	Shepard Modificado	0,059	0,000	-74746,897	18555,049	0,003
CARTA NÁUTICA	Krigagem	0,582	0,748	-54,356	8,004	0,174
	Vizinho Natural	0,584	0,747	-54,252	7,859	0,189
	Triang. Interp. Linear	0,583	0,747	-54,336	7,842	0,188
	Função Base Radial	0,577	0,744	-54,952	8,101	0,178
	Regressão Polinomial	0,573	0,739	-54,929	8,170	0,178
	Vizinho mais Próximo	0,573	0,739	-54,929	8,170	0,178
	Shepard Modificado	0,574	0,739	-55,980	8,340	0,185
	Inverso da Distância	0,545	0,694	-56,250	8,127	0,210
	Mínima Curvatura	0,494	0,683	-70,141	10,295	0,142
	Polinômio Local	0,423	0,438	-63,650	9,891	0,175
	Média Móvel	0,562	0,099	-1305,695	152,482	N/D
	Métrica de Dados	N/D	0,099	-1124,731	128,850	N/D

Tabela 5.6 - Valores de coeficiente de correlação, índice concordância, MAPE, RMSE e Validação cruzada para cada interpolador, ordenados de acordo com os menores valores do módulo do MAPE.

RANKING MAPE						
DADOS	INTERPOLADOR	R ²	d	MAPE (%)	RMSE	VALIDAÇÃO CRUZADA
PETROBRAS/UFRN	Polinômio Local	0,614	0,733	-59,131	7,981	0,246
	Mínima Curvatura	0,610	0,732	-59,202	8,224	0,242
	Regressão Polinomial	0,577	0,729	-59,237	8,606	0,194
	Inverso da Distância	0,612	0,733	-59,268	8,226	0,239
	Vizinho mais Próximo	0,610	0,730	-59,286	8,234	0,249
	Triang. Interp. Linear	0,610	0,731	-59,534	8,170	0,243
	Krigagem	0,608	0,729	-59,548	8,194	0,240
	Vizinho Natural	0,609	0,730	-59,569	8,131	0,239
	Média Móvel	N/D	0,374	-73,858	13,117	N/D
	Função Base Radial	0,340	0,427	-86,698	18,676	0,091
	Métrica de Dados	0,137	0,101	-1160,157	135,119	N/D
	Shepard Modificado	0,059	0,000	-74746,897	18555,049	0,003
CARTA NÁUTICA	Vizinho Natural	0,584	0,747	-54,252	7,859	0,189
	Triang. Interp. Linear	0,583	0,747	-54,336	7,842	0,188
	Krigagem	0,582	0,748	-54,356	8,004	0,174
	Vizinho mais Próximo	0,573	0,739	-54,929	8,170	0,178
	Regressão Polinomial	0,573	0,739	-54,929	8,170	0,178
	Função Base Radial	0,577	0,744	-54,952	8,101	0,178
	Shepard Modificado	0,574	0,739	-55,980	8,340	0,185
	Inverso da Distância	0,545	0,694	-56,250	8,127	0,210
	Polinômio Local	0,423	0,438	-63,650	9,891	0,175
	Mínima Curvatura	0,494	0,683	-70,141	10,295	0,142
	Métrica de Dados	N/D	0,099	-1124,731	128,850	N/D
	Média Móvel	0,562	0,099	-1305,695	152,482	N/D

Tabela 5.7 - Valores de coeficiente de correlação, índice concordância, MAPE, RMSE e Validação cruzada para cada interpolador, ordenados de acordo com os menores valores de RMSE.

RANKING RMSE						
DADOS	INTERPOLADOR	R ²	d	MAPE (%)	RMSE	VALIDAÇÃO CRUZADA
PETROBRAS/UFRN	Polinômio Local	0,614	0,733	-59,131	7,981	0,246
	Vizinho Natural	0,609	0,730	-59,569	8,131	0,239
	Triang. Interp. Linear	0,610	0,731	-59,534	8,170	0,243
	Krigagem	0,608	0,729	-59,548	8,194	0,240
	Mínima Curvatura	0,610	0,732	-59,202	8,224	0,242
	Inverso da Distância	0,612	0,733	-59,268	8,226	0,239
	Vizinho mais Próximo	0,610	0,730	-59,286	8,234	0,249
	Regressão Polinomial	0,577	0,729	-59,237	8,606	0,194
	Média Móvel	N/D	0,374	-73,858	13,117	N/D
	Função Base Radial	0,340	0,427	-86,698	18,676	0,091
	Métrica de Dados	0,137	0,101	-1160,157	135,119	N/D
	Shepard Modificado	0,059	0,000	-74746,897	18555,049	0,003
CARTA NÁUTICA	Triang. Interp. Linear	0,583	0,747	-54,336	7,842	0,188
	Vizinho Natural	0,584	0,747	-54,252	7,859	0,189
	Krigagem	0,582	0,748	-54,356	8,004	0,174
	Função Base Radial	0,577	0,744	-54,952	8,101	0,178
	Inverso da Distância	0,545	0,694	-56,250	8,127	0,210
	Vizinho mais Próximo	0,573	0,739	-54,929	8,170	0,178
	Regressão Polinomial	0,573	0,739	-54,929	8,170	0,178
	Shepard Modificado	0,574	0,739	-55,980	8,340	0,185
	Polinômio Local	0,423	0,438	-63,650	9,891	0,175
	Mínima Curvatura	0,494	0,683	-70,141	10,295	0,142
	Métrica de Dados	N/D	0,099	-1124,731	128,850	N/D
	Média Móvel	0,562	0,099	-1305,695	152,482	N/D

Tabela 5.8 Valores de coeficiente de correlação, índice concordância, MAPE, RMSE e Validação cruzada para cada interpolador, ordenados de acordo com os maiores valores de validação cruzada.

RANKING VALIDACAO CRUZADA						
DADOS	INTERPOLADOR	R ²	d	MAPE (%)	RMSE	VALIDAÇÃO CRUZADA
PETROBRAS/UFRN	Média Móvel	0,610	0,730	-59,286	8,234	0,249
	Métrica de Dados	0,614	0,733	-59,131	7,981	0,246
	Vizinho mais Próximo	0,610	0,731	-59,534	8,170	0,243
	Polinômio Local	0,610	0,732	-59,202	8,224	0,242
	Triang. Inter. Linear	0,608	0,729	-59,548	8,194	0,240
	Mínima Curvatura	0,612	0,733	-59,268	8,226	0,239
	Krigagem	0,609	0,730	-59,569	8,131	0,239
	Inverso da Distância	0,577	0,729	-59,237	8,606	0,194
	Vizinho Natural	0,340	0,427	-86,698	18,676	0,091
	Regressão Polinomial	0,059	0,000	-74746,897	18555,049	0,003
	Função Base Radial	N/D	0,374	-73,858	13,117	N/D
	Shepard Modificado	0,137	0,101	-1160,157	135,119	N/D
CARTA NÁUTICA	Métrica de Dados	0,545	0,694	-56,250	8,127	0,210
	Média Móvel	0,584	0,747	-54,252	7,859	0,189
	Inverso da Distância	0,583	0,747	-54,336	7,842	0,188
	Vizinho Natural	0,574	0,739	-55,980	8,340	0,185
	Triang. Inter. Lienar	0,577	0,744	-54,952	8,101	0,178
	Shepard Modificado	0,573	0,739	-54,929	8,170	0,178
	Função Base Radial	0,573	0,739	-54,929	8,170	0,178
	Regressão Polinomial	0,423	0,438	-63,650	9,891	0,175
	Vizinho mais Próximo	0,582	0,748	-54,356	8,004	0,174
	Polinômio Local	0,494	0,683	-70,141	10,295	0,142
	Krigagem	N/D	0,099	-1124,731	128,850	N/D
	Mínima Curvatura	0,562	0,099	-1305,695	152,482	N/D

Uma vez as tabelas montadas, foi contabilizado a quantidade de vezes que cada interpolador estava entre os quatro melhores resultados conforme mostrado na tabela 5.9.

Tabela 5.9 - Ranking de classificação dos interpoladores que tiveram os melhores resultados considerando o índice de correlação, índice de concordância, MAPE, RMSE e Validação Cruzada.

RANKING INTERPOLADORES COM MELHORES RESULTADOS		
DADOS	INTERPOLADOR	Nº de vezes entre os 4 primeiros de cada Ranking
PETROBRAS/UFRN	Polinômio Local	5
	Inverso da Distância	3
	Mínima Curvatura	3
CARTA NÁUTICA	Vizinho Natural	5
	Triang. Interp. Linear	4
	Krigagem	4
	Função Base Radial	3

Analisando os resultados na tabela 5.3, percebe-se inicialmente que existem valores que não foram definidos para o coeficiente de correlação e de validação cruzada para interpolações métrica de dados e média móvel o que é relativamente normal para esses interpoladores visto que não raro eles produzem resultado discrepante. Outro ponto que chama atenção são os valores anômalos do interpolador Shepard modificado para os dados Petrobras/UFRN. Analisando o produto dessa interpolação verificou-se que ele deixou um grande vazio em uma determinada região do mapa, a qual ficou sem dados e por isso gerou tal resultado.

Por seguinte, verificou-se que a média móvel e a métrica de dados foram classificados como os melhores resultados de validação cruzada (tabela 5.8), o que mostra que esse parâmetro nesse caso pode não ser uma boa referência, já que a média móvel e a métrica de dados são notoriamente péssimos interpoladores.

Por fim constatou-se que os interpoladores Polinômio Local, Inversos da Distância e Mínima Curvatura foram os melhores resultados para os dados Petrobras/UFRN (tabela 5.9), os três já haviam sido classificados por Moura (2010)

como interpoladores com forte correlação entre o dado de entrada e o dado de saída da interpolação. O Inverso da Distância e a Mínimo Curvatura também foram classificados por Moura (2010) como interpoladores que reproduziam bem as feições representadas na imagem processada por Gomes (2007), porém o interpolador Polinômio Local não. Isso chama a atenção por ele ter sido justamente o interpolador que teve os melhores resultados.

No caso da Carta Náutica, os melhores interpoladores foram Vizinho Natural, Triangulação por Interpolação Linear, Krigagem e Função de Base Radial (tabela 5.9). Moura (2010) classificou a Triangulação por Interpolação Linear, a Krigagem e o Vizinho Natural também entre os seis interpoladores de forte correlação comparando os dados de entrada e de saída do interpolador. Porém, o interpolador Função de Base Radial não se encontrava entre o 6.

Capítulo VI

CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÕES

A hipótese desse trabalho foram de que se fosse usada uma batimetria proveniente de uma imagem de satélite para fazer uma análise quantitativa poder-se-ia obter um resultado diferente. Portanto, foi proposto responder à pergunta: É possível uma imagem de satélite colaborar para a análise dos interpoladores usados em dados de extração de batimetria?

As imagens de satélites geraram mapas a partir de onde pode-se obter a morfologia marinha com valores de profundidade. Esses dados foram comparados com as extrações de batimetria por dados de carta náutica e por dados de batimetria Petrobras/UFRN. Para cada interpolador foi calculado MAPE, RMSE, Coeficiente de Correlação e Índice de Concordância.

Definiu-se um ranking dos interpoladores que apresentavam o resultado com menor erro de acordo com MAPE. Foram registrados então os 4 melhores interpoladores. Da mesma forma foi feito para o RMSE, Coeficiente de Correlação e Índice de Concordância. E finalmente foi contabilizado o número de vezes que cada interpolador apareceu entre os 4 primeiros de cada ranking.

Em relação aos métodos de extração de batimetria de imagem de satélite, observou-se que mesmo o método de Philpot (1989) tendo produzido um mapa que faltavam valores de profundidade, ainda assim ele foi capaz de produzir boas delineações, melhores até do que as de Mcfeeters (1996). **O método Mcfeeters (1996) foi determinado como o mais apropriado nesse trabalho.**

No que diz respeito à quantidade de pontos necessários da batimetria Petrobras/UFRN, considerando que se for usada 50%, 75% e 100% dos pontos não há grandes variações na qualidade do perfil dos três gráficos (Figura 5.7, 5.8 e 5.9)

conclui-se que é possível reduzir em 50% a quantidade de pontos usadas no levantamento.

Em relação à análise visual dos interpoladores, notando-se que os métodos Shepard Modificado, Krigagem, Vizinho Natural e IDP (Inverso da Potência das Distâncias) são os que apresentam os maiores valores de validação cruzada e não mostram comportamentos discrepantes como os presentes na Métrica de Dados, na Regressão Polinomial e na Média Móvel, pode-se em um primeiro momento elegê-los como os melhores métodos. Porém considerando que o método de Shepard Modificado apresenta uma inconsistência em relação ao padrão de cores (profundidade) do mapa em relação aos demais, descarta-se este. Sendo assim Krigagem, Vizinho Natural e IDP (Inverso da Potência das Distâncias) foram determinados como os métodos de interpolação mais apropriados para os dados de batimetria extraído por imagem de satélite por meio do método Mcfeeters (1996).

Moura (2010) verificou na Bacia Potiguar com os dados de batimetria de Cartas Náuticas e dados de batimetria realizados pela Petrobras/UFRN (GEMMA/GEOPRO), que os interpoladores que produziam melhores resultados eram Vizinho Natural, Krigagem, Triangulação por Interpolação Linear, Inverso da Distância, Vizinho Mais Próximo, Mínima Curvatura, Função de Base Radial e Polinômio Local. Destes quando comparados com as feições reais, os que melhor reproduziam a área era Vizinho Natural, Krigagem, Triangulação por Interpolação Linear, Inverso da Distância, Vizinhos Mais Próximo e Mínima Curvatura. No seu trabalho ele usou a validação cruzada, MAPE, RMSE, R^2 e índice de concordância para avaliar os resultados comparando os resultados das interpolações apenas com os dados de origem. Além disso ele fez uma comparação visual dos resultados com uma imagem de satélite.

Nos resultados que Moura (2010) obteve não foi constatado o interpolador polinômio local entre os melhores. Porém nesse trabalho ao usar como base de referência os dados de batimetria extraídos por imagem de satélite, este interpolador foi classificado como o que obteve os melhores índices. **Isso mostra que a extração de batimetria por imagem pode sim complementar a análise dos interpoladores usados nos dados de batimetria carta náutica e Petrobras/UFRN.**

O fato do interpolador de Função de Base Radial também ter se destacado nessa análise sem antes ter apresentado uma forte correlação no trabalho de Moura

(2010) também contribui para ideia da possibilidade de colaboração da batimetria extraída por imagem de satélite.

6.5 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Um possível estudo que poderia ser realizado em trabalhos futuros, seria o uso do menor valor de radiância da imagem no método Philpot (1989), o que contraria um princípio do método, mas que permitiria a produção de um mapa completo, sem espaços vazios.

Sobre a quantidade de pontos necessários no dado Petrobras/UFRN uma recomendação para trabalhos futuros, seria avaliar quantidade de pontos intermediária entre 25% e 50% do total.

Além disso, percebeu-se que a imagem de satélite usada possuía muitos sedimentos de cor marrom em suspensão o que prejudicou a visualização do fundo. Uma recomendação para trabalhos futuros seria a pesquisa por imagens com menos sedimentos desse tipo em suspensão, permitindo uma melhor visualização do fundo.

Referências

Accioly, L. J. De O.; Costa, T. C. e C.; Oliveira, M. A. J.; Silva, F. H. B. B.; Burgos, N.; (2002). O papel do sensoriamento remoto na avaliação e no monitoramento dos processos de desertificação do semiárido brasileiro. I Simpósio Regional de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto. Aracaju.

Amaro V. E.; Lima F.G.F.; Santos M.S.T.; (2013) An evaluation of digital elevation models to short-term monitoring of a high energy barrier island, northeast Brazil. *International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering* Vol:7, No:4.

Bello-Pineda, J.; Stefanoni-Hernández, J.L.; (2007) Comparing the performance of two spatial interpolation methods for creating a digital bathymetric model of the Yucatan submerged platform. *Pan-Am. J. Aquat. Sci.* 2, 247–254.

Bowles; Vogt, F.; Jung, W.; (1998). Bathymetry (Part I), sedimentary regimes (Part II), and abyssal water disposal potential near the conterminous United States. *Journal of Marine Systems*, 14: 211-239.

CHM - Centro de Hidrografia da Marinha. Carta de 31/05/2016, código:720. Disponível em https://www.mar.mil.br/dhn/chm/box-cartas-raster/raster_disponiveis.html e acessado em 1 mar. 2017.

Chaves, M. Vital, H., Silveira, I. M.; (2006). Beach morphodynamics of the serra oil field, northeastern Brazil: *Journal of Coastal Research, Special Issue*, v. 39, p. 594-597.

Costa Neto, L. X. da.; (2009). Caracterização Geológica, Geomorfológica e Oceanográfica do Sistema Pisa Sal, Galinhos-RN. Tese de doutorado. Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica – UFRN, Natal.

Costa, R. O. L.; (2015). Foramíferos, Ostracodes e Microfauna Associada da Plataforma Continental Equatorial Norte-Riograndense, NE Brasil: Área Porto do Mangue a Galinhos. Dissertação de mestrado. Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica – UFRN, Natal.

Curtarelli M.; Leão J.; Ogashawara I.; Lorenzzetto J.; Stech J.; (2015) Assessment of spatial interpolation methods to map the bathymetry of an amazonian hydroelectric reservoir to aid in decision making for water management. *International Journal of Geo-Information*.

Dominguez, J. M. L., Bittencourt, A. C. S. P., Martin L.; (1992). Controls on quaternary coastal evolution of the east-northeastern coast of Brazil: roles of sea level history, trade winds and climate. *Sediment. Geol.* 80, 213 -232

Ferreira, A. T. S.; Amaro, V. E.; Santos, M. S. T.; (2014). Geodésia aplicada à integração de dados topográficos e batimétricos na caracterização de superfícies de praia. *Revista Brasileira de Cartografia* Nº 66/1: 167-184.

Fortes, F.; (1987). Mapa Geológico da Bacia Potiguar (1:100.000). PETROBRAS/DEBAR/DINTER/SEBAT, Relatório Interno, 125pp.

Frazão, L.S.; (2016). Morfologia Submersa do Cânion Apodi-Mossoró Baseado em Dados *in situ* e Geotecnologias Multifontes. Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Gao J.; (2009) Bathymetric mapping by means of remote sensing: methods, accuracy and limitations. *Progress in Physical Geography* 33(1) (2009) 103–116

Góis, D. M. M. de; (2008). Estudo da Circulação Hidrodinâmica e da Dispersão de óleo na Zona Costeira entre Macau e Galinhos – RN. Dissertação de Mestrado. Pós-Graduação em Engenharia Sanitária. UFRN, Natal.

Gomes, M. P.; Vital, H.; Macedo, J. W. P.; (2007). Processamento Digital de Imagens Multiespectrais Aplicado no Realce dos Ambientes Marinho Raso e Profundo da Região de Plataforma Continental e Talude da Bacia Potiguar. In: XXII Simpósio de Geologia do Nordeste. Natal-RN.

Gomes, M. P.; (2009). Aquisição, Processamento e Análise de Dados de Sísmica de Alta Resolução na Plataforma Continental Norte do Rio Grande do Norte: Vale Inciso do Rio Açu. Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Gomes, M. P.; Vital H. (2010). Revisão da compartimentação geomorfológica da Plataforma Continental Norte do Rio Grande do Norte, Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*. 40(3) 321-329.

Gonzalez, R. C., Woods, R.E.; (2002): Digital Image Processing. 2nd ed. Upper Saddle River, New Jersey.

Klenke, M.; Schenke, H. W.; (2002). A new bathymetric model for the central Fram Strait. *Marine Geophysical Researches*, 23: 367– 378.

Li, J.; Heap A.D. A review of spatial interpolation methods for environmental scientists; Geoscience Australia: Canberra, Australia, 2008.

Lima, S. F.; (2006). Caracterização Geomorfológica e Paleogeográfica da Plataforma Continental Adjacente a Foz do Rio Apodi-Mossoró, RN/ Brasil. Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica. Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Manual de Usuário do Surfer. Disponível em: http://surferhelp.goldensoftware.com/#t=surfer%2Fintroduction_to_surfer.htm e acessado em 03 jan. 2017.

Matos, M. F. A.; Fortes, C. J. E. M.; Amaro, V. E.; Scudelari, A. C. (2011) Análise de dados a partir de métodos in situ no litoral setentrional do Rio Grande do Norte. In: Congresso Sobre Planejamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa, 6, 2011, Boa Vista. Anais... Cabo Verde: APRH. P.71.

Matos, M. F. A.; (2013). Modelagem do Clima de Ondas e seus Efeitos Sobre as Feições Morfológicas Costeiras no Litoral Setentrional do Rio Grande do Norte. Tese de doutorado. Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica – UFRN, Natal.

Matos, M. F. A.; AMARO, V. E. (2011) Oscillatory Coastal Wave and Currents Profile in the Northern Continental Shelf of Rio Grande do Norte State, Northeast Brazil. In: International Geoscience Programme, 5, Sidney. Abstract... Sidney: UNESCO/IUGS/Project 526, 2011, 8p.

McFeeters, S. K.; (1996) The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17 (7). 1996. p. 1425-1432.

Meneses, P. R.; Almeida, T.; Rosa, A.N.C.S.; Sano, E.E.; Souza, E.B.; Baptista, G.M.M.; Brites, R.S.; (2012). Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento remoto. Brasília.

Meng, Q.; Liu, Z.; Borders, B.E.; (2013) Assessment of regression kriging for spatial interpolation - comparisons of seven GIS interpolation methods. *Cartography and Geographic Information Science*.

Merwade, V.M.; Maidment, D.R.; Goff, J.A.; (2006). Anisotropic considerations while interpolating river channel bathymetry. *J. Hydrol.* 331, 731–741.

MMA - Ministério do Meio Ambiente. Disponível em <http://www.mma.gov.br/informma/item/6618-a-biodiversidade-na-zona-costeira-e-marinha-do-brasil> e acessado em 19 fev. 2018.

Moura, J. E.; Amaro, V. E.; Scudelari A. C.; (2009) Estudo da representação de área de batimetria rasa através de MDT's gerados pelo *surfer*. Congresso Latino-americano de Ciências del Mar.

Moura J. E.; (2010). Influência dos Modelos Digitais de Terreno na Modelagem de Circulação Hidrodinâmica 2DH: Um Estudo de Caso. Dissertação de mestrado. Pós-graduação em Engenharia Civil – UFRN, Natal.

Murphy, R. R.; Curriero, F. C.; Ball, W. P.; (2010) Comparison of spatial interpolation methods for water quality evaluation in the Chesapeake bay. *Journal of Environmental Engineering*.

Panhalkar S. S.; Amol P. J.; (2015) Assessment of spatial interpolation techniques for river bathymetry generation of Panchganga river basin using geoinformatic techniques. *Asian Journal of Geoinformatics*, Vol.15,No.3.

Philpot, W. D.; (1989) Bathymetric mapping with passive multispectral imagery. *Applied Optics*. Vol. 28 (8), p.1569-1578.

Šiljeg A.; Lozić S.; Šiljeg S.; (2015) A comparison of interpolation methods on the basis of data obtained from a bathymetric survey of Lake Vrana, Croatia. *Hydrology and Earth System Sciences*.

Sabins, F.F.; (1978). *Remote Sensing, Principles and Interpretation*. San Francisco.

Souza, C.R. de G.; Souza Filho, P.W.M.; Esteves, S.L.; Vital H.; Dillenburg, S.R.; Patchineelam, S.M.; Addad, J.E.; (2005). Praias arenosas e erosão costeira. *Quaternário do Brasil*. Holos Editora, p. 130-152.

USGS - United States Geological Survey. Disponível em <https://earthexplorer.usgs.gov/> e acessado em 10 dez. 2016.

Vital, H.; Silveira, I. M.; Amaro, V. E. (2005). Carta sedimentológica da plataforma continental brasileira – área Guamaré a Macau (NE Brasil), utilizando integração de dados geológicos e sensoriamento remoto. *Revista Brasileira de Geofísica*. 23(3): 233-241.

Vital, H. (2009).; The mesotial barriers of Rio Grande do Norte. *Geology and geomorphology of holocene coastal barriers of Brazil*. Springer-Verlag.. Heildelberg: Springer-Verlag, p. 289-324.

Willmot, C. J.; Ackleson, S. G.; Davis, R. R.; Feddema, J. J.; Klink, K. M.; Legates, D. R.; O'donnel, J.; Rowe, C. M.; (1985) Statistics for the evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research*.

Wright, D. J.; Bloomer, S. H.; MacLeod, C. J.; Taylor, B.; Goodlife, A. M.; (2000) Bathymetry of the tonga trench and forearc: a map series. *Marine GeoPhysical Reseraches*, 21: 489 – 511.

Yang, C. S.; KAO, S. P.; Lee, F. B.; Hung, P. S.; (2004) Twelve different interpolation methods: a case study of Surfer 8.0. XX International Society for Photogrammetry and Remote Sensing. *Proceedings*. Vol. XXXV, part B-2, p.778-785.