

Revista Brasileira de Cartografia (2016), Nº 68/3: 527-538
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO NA GERAÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO DE PRECISÃO EM ZONAS COSTEIRAS DE ALTA DINÂMICA SEDIMENTAR

Evaluation of Interpolation Methods in Generating High-Accuracy Digital Elevation Models in Very Dynamic Coastal Zones

**Francisco Gabriel Ferreira de Lima^{1,2}, Venerando Eustáquio Amaro^{1,2}
Marcelo Soares Teles Santos³ & André Luís Silva dos Santos⁴**

¹Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN

Departamento de Geologia, Laboratório de Geoprocessamento

Caixa Postal 1584, Campus Universitário Lagoa Nova, CEP: 59078-970, Natal/RN - Brasil
gabrielfleng@gmail.com, amaro@geologia.ufrn.br

²Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN

Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica – PPGG

Caixa Postal 1584, Campus Universitário Lagoa Nova, CEP: 59078-970, Natal/RN - Brasil
amaro@geologia.ufrn.br

³Universidade Federal do Sul da Bahia – UFSB

Centro de Formação em Tecnociências e Inovação - CFTI

Câmpus Universitário, CEP 45613-204, Itabuna /BA - Brasil
marcelostsantos@ufsb.edu.br

⁴Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão – IFMA

Departamento Acadêmico de Informática - DA

Av. Getulio Vargas, 05 - Monte Castelo, CEP: 65062-610, São Luis/MA, Brasil
andresantos@ifma.edu.br

Recebido em 30 de Maio, 2014/ Aceito em 18 de Agosto, 2015

Received on May 30, 2014/ Accepted on August 18, 2015

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo identificar o método interpolador mais adequado para ser utilizado na geração de Modelo Digital de Elevação (MDE) de superfícies de praia obtidas pelo posicionamento relativo cinemático do GPS (Global Positioning System). Para isso, foi realizado um estudo de caso na Ilha Ponta do Tubarão, área de aproximadamente 5 km de extensão submetida à intensa dinâmica costeira, localizada no Litoral Setentrional do Estado do Rio Grande do Norte. Além de avaliados por pontos de controle externos aos modelos, os MDE gerados por diferentes interpoladores foram submetidos às análises de acurácia, precisão e tendência, sendo classificados em conformidade com o padrão das instruções reguladoras das normas técnicas da Cartografia Nacional. Os principais interpoladores encontrados na literatura foram avaliados: interpoladores *Inverse Distance Weighted (IDW)*, Krigagem, *Spline*, *Triangulated Irregular Network (TIN)*, *Topo to Raster (TtR)*, *Trend* e *Vizinho Natural*. De acordo com a classificação de documentos cartográficos, o MDE gerado pelo método TIN foi o único completamente livre de tendência e classificado como classe A em termos de precisão e acurácia, para um nível de confiança de 90%. Os resultados obtidos geraram indicadores consistentes nas tomadas de decisão quanto ao método interpolador mais adequado à modelagem digital de elevação de superfícies praias.

Palavras Chaves: Interpolação, Modelos Digitais de Elevação, Monitoramento Costeiro.

ABSTRACT

In a zone with approximately 30 km of shoreline between the municipalities of Macau and Guamaré in Rio Grande do Norte State, Northeast Brazil, Digital Elevation Models (DEM) were generated based on seasonal planialtimetric high precision surveying using Global Navigation Satellite Systems (GPS) on kinematic mode. The geodetic stations of the GPS Network of Northern Coastal Rio Grande do Norte were distributed throughout the area and used as reference marks for high precision positioning. The DEM multitemporal comparison improves understanding on coastal dynamics in the region, especially with regard to the processes of erosion/progradation, transport, sediment supply and balance. This paper presents an analysis of some statistical parameters, in order to determine the most appropriate interpolation method for DEM generation on Ponta do Tubarão Island, highly dynamic area, besides classifying cartographic models according to Technical Standards of the *National Cartography*. The results showed that triangulated irregular network interpolator (TIN) is the most appropriate to represent costal morphology on high precision shore monitoring. According to Technical Standards of the *National Cartography* requirements the generated MDE were classified as class A in precision and accuracy, in addition to being free of bias.

Keywords: GPS Network, Digital Elevation Model, Coastal Monitoring.

1. INTRODUÇÃO

Devido aos benefícios de precisão, eficiência, rapidez e baixo custo, o uso do sistema de posicionamento global GPS (*Global Navigation Satellite System*) na aquisição de informações planialtimétricas para geração de Modelos Digitais de Elevação (MDE) tem permitido importantes contribuições em monitoramentos costeiros do Litoral Setentrional do Estado do Rio Grande do Norte (RN). O posicionamento relativo cinemático do GPS tem permitido a determinação de coordenadas geodésicas (latitude, longitude, altitude geométrica) de pontos amostrais representativos do relevo com acurácia de poucos centímetros em relação aos referenciais planimétricos e altimétricos adotados oficialmente pelo Sistema Geodésico Brasileiro (SGB). Para isso, são utilizadas, como referências, estações geodésicas da Rede GPS do Litoral Setentrional do RN (RGLS), implantada na área de estudo ao longo de uma faixa de 30 km de litoral (SANTOS & AMARO, 2011).

A comparação multitemporal (interdecadal, interanual e intra-anual ou sazonal) dos MDE tem permitido o cálculo e a representação das variações da Linha de Costa (doravante referida pela sigla LC) e da geomorfologia da orla, contribuindo para a identificação de locais mais sensíveis à erosão e onde, tipicamente, observa-se acreção generalizada (SANTOS *et al.*, 2011; SANTOS & AMARO, 2011; SANTOS *et al.*, 2012). Estudos dessa natureza poderão subsidiar a elaboração de modelos de prognósticos da

posição futura da LC, auxiliar nos estudos sobre os efeitos da elevação do nível relativo do mar, compreender a relação com fenômenos climáticos globais/regionais e com atividades antrópicas em áreas de intensa dinâmica costeira. Essas informações poderão, ainda, ser associadas a dados meteorológicos e oceanográficos, o que permitirá a compreensão integrada dos processos costeiros e dos agentes modificadores da paisagem. Portanto, são indispensáveis na orientação de práticas de uso e gestão sustentável da zona costeira (AMARO *et al.*, 2012).

Na geração dos MDE, os pontos topográficos planialtimétricos coletados em campo pelo sistema GPS são submetidos a um processo de interpolação, no qual, pontos localizados no interior da área são estimados a partir dos pontos amostrais. Vários algoritmos de interpolação estão disponíveis em diversos programas de processamento de dados espaciais, entre eles destacam-se: *Inverse Distance Weighted (IDW)*, *Krigagem*, *Spline*, *Triangulated Irregular Network (TIN)*, *Topo to Raster (TtR)*, *Trend* e *Vizinho Natural*.

Cada interpolador possui seus próprios algoritmos e peculiaridades, mas, costuma-se agrupá-los conforme a organização dos dados em malhas regulares (reticulação) ou irregulares (triangulação), como apresentam Santos *et al.* (2008) e Fernandes e Menezes (2005). No primeiro caso, os valores a serem estimados são representados pelos nós formados pela malha regular estabelecida, que podem ou não conter um ponto amostrado (por exemplo, *IDW*, *Krigagem*, *Spline*, *TtR* e *Trend*). No segundo

caso, os pontos são conectados formando triângulos em que cada aresta é interpolada linearmente (por exemplo, TIN).

Uma vez que, cada interpolador gera um MDE diferente, deve-se analisar qual método consegue representar a superfície praial de forma mais fiel. A utilização arbitrária desses interpoladores pode levar a imprecisões não só no volume total de sedimentos monitorados, mas também favorecer a identificação equivocada de locais onde o balanço sedimentar é positivo (acrecção) ou negativo (erosão), indicando ainda de forma equivocada o tipo e a localização das feições morfológicas praiais. Portanto, a avaliação e a identificação do método interpolador que melhor represente a superfície praial, por meio de pontos de controle externos, é de grande relevância aos monitoramentos costeiros.

Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo identificar o método interpolador mais adequado para ser utilizado na geração de MDE obtido pelo posicionamento GPS em superfícies praiais de alta dinâmica sedimentar. Para isso, como estudo de caso, foi realizado o levantamento GPS no modo relativo cinemático pós-processado na Ilha Ponta do Tubarão, área de aproximadamente 5 km de extensão submetida à intensa dinâmica costeira, localizada no Litoral Setentrional do Estado do Rio Grande do Norte. Além de avaliados, os MDE gerados pelos diferentes interpoladores foram classificados em conformidade com o padrão das instruções reguladoras das normas técnicas da Cartografia Nacional. Espera-se, com isso, gerar indicadores consistentes nas tomadas de decisão quanto ao método interpolador mais adequado à modelagem digital de elevação de superfícies praiais.

2. ÁREA DE ESTUDO

A Figura 1 apresenta a área de estudo com a distribuição espacial das nove estações da RGLS, estabelecida por Santos & Amaro (2011), que serviram de referência aos levantamentos geodésicos realizados neste trabalho. Localizada entre os municípios de Macau e Guamaré, a área é configurada por um sistema de praias oceânicas, ilhas barreiras, canais de maré, planícies areno-lamosas com manguezais e campos de dunas móveis.

Trata-se de uma região de alta sensibilidade ambiental devido à alta intensidade de processos

costeiros, com alto transporte eólico e litorâneo, erosão generalizada, alterações no balanço de sedimentos, variações na LC, abertura e fechamento de canais de marés. Tais processos são influenciados pela conformação geológico-geomorfológica local interagindo com a ação direta dos agentes dinâmicos costeiros (clima, vento, marés, ondas e correntes marinhas) e pela interferência de atividades industriais (petróleo, salinas, parques eólicos e carcinicultura), aglomeradas ao longo de uma faixa de 30 km desse litoral (Santos *et al.*, 2011).

As atividades socioeconômicas presentes na área vêm enfrentando sérios problemas operacionais devido ao avanço relativo do nível do mar e à intensa dinâmica costeira, que promove significativa remobilização dos sedimentos em curtos intervalos de tempo, causando problemas ambientais e de manutenção da infraestrutura instalada no local (Souto *et al.*, 2004; Grigio *et al.*, 2005).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais e métodos utilizados na aquisição de dados e na geração e avaliação dos MDE gerados pelos métodos interpoladores são descritos a seguir.

3.1 Técnica de aquisição de dados

Neste trabalho, a LC foi definida como o limite de máximo espraiamento das ondas na face de praia durante a maré de quadratura em preamar, ou seja, o alcance máximo da linha d'água. Essa feição morfológica define o limite externo ou oceânico do modelo. O limite interno ou continental do modelo é definido de acordo com as feições morfológicas encontradas no caminhamento (SANTOS *et al.*, 2011). Entre os limites interno e externo encontram-se as superfícies de praia com as feições morfológicas características do sistema praial.

Os levantamentos das LC e das superfícies de praia foram realizados pelo posicionamento relativo cinemático pós-processado do GPS, com uso de receptores do modelo Trimble R3, cuja precisão nominal horizontal é de 5 mm + 1 ppm e a vertical é de 5 mm + 2 ppm. Assim, para uma distância de 5 km, por exemplo, os erros estimados são de 10 mm na horizontal e 15 mm na vertical. No posicionamento, um dos receptores é instalado em uma estação

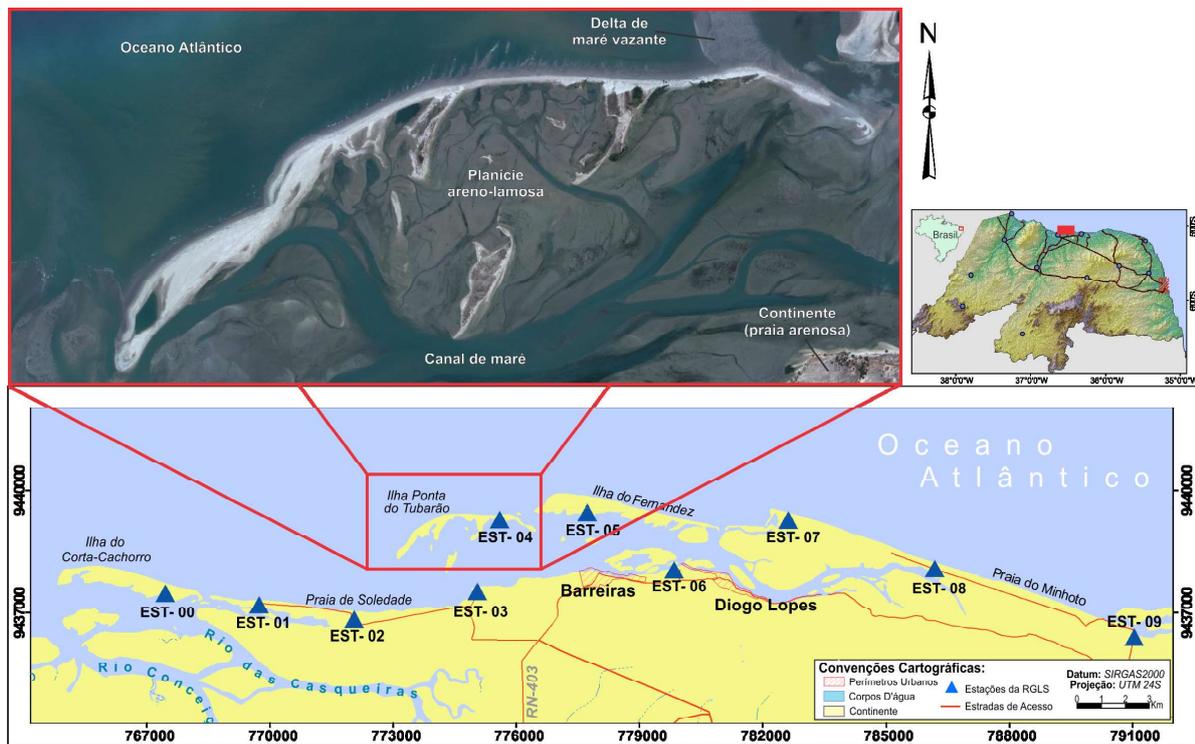


Fig. 1 - Localização da área de estudo com as nove estações da RGLS distribuídas entre as praias de Soledade e Minhoto, e nas ilhas barreiras de Ponta do Tubarão e Fernandez, situadas no litoral setentrional do Rio Grande do Norte (indicada por retângulo vermelho). Em destaque, uma imagem do satélite QUICKBIRD, mostrando a conformação da IPT em outubro de 2010.

de referência da RGLS (Figura 1) enquanto o outro deslocado pelos pontos de interesse ao longo da LC e das superfícies de praia. Os dados rastreados são armazenados nos receptores e, após o processamento, obtém-se as coordenadas geodésicas (latitude, longitude e altitude geométrica) de cada ponto levantado no caminhamento. Os processamentos dos dados foram realizados com o software *TopconTools* versão 7.5.1.

Para aumentar a produtividade na aquisição de dados, o receptor móvel foi acoplado a um quadriciclo motorizado. O procedimento para rastreamento consistiu em: fixar o bastão com a antena do GPS sobre o suporte do quadriciclo, localizado na lateral do automóvel; nivelar a antena pelo nível de bolha do bastão; medir a altura da antena, corrigida da distância vertical do quadriciclo ao solo; e programar o receptor. No entanto, em pequenos trechos de difícil acesso a veículos, optou-se pelo deslocamento do bastão por um operador a pé, mantendo o bastão na vertical e a uma altura constante da antena em relação ao solo. O receptor móvel foi programado para

coletar dados no modo cinemático em função do tempo e com taxa de amostragem de 1s. O uso do quadriciclo acrescenta uma fonte de erro adicional à modelagem digital de elevação: o erro de verticalidade do bastão da antena. Para as aplicações deste trabalho esses erros podem ser considerados desprezíveis, pois, são absorvidos pelas outras fontes de erros da modelagem.

No levantamento da LC os pontos amostrais planialtimétricos foram coletados logo após o pico da maré de preamar, seguindo as marcas de deixa (ou espraiamento) mais recentes, indicadas tanto por sujeiras deixadas pelas marés quanto pela diferença de umidade de areia seca e úmida. A maré de quadratura foi definida como referência em função da logística de campo, uma vez que, nas marés de sizígia, o acesso a certos segmentos costeiros ficariam limitados. Nas superfícies de praia, os pontos amostrais foram coletados em caminhamentos ao logo das feições morfológicas e interceptando-as, podendo ser orientados nos modos longitudinais, transversais e/ou inclinados em relação às LC.

A amostragem de pontos topográficos deve ser compatível, em número e distribuição espacial, com as características morfológicas do terreno e a precisão requerida para sua modelagem. Quanto mais complexa a feição morfológica em campo, mais pontos topográficos devem ser coletados, para evitar deficiência de dados (subamostragem). Por outro lado, deve-se evitar a redundância de dados (superamostragem) que, na maioria dos casos, não acrescenta informações ao modelo e encarece desnecessariamente o levantamento. Segundo Blitzkow *et al.* (2009), nenhuma metodologia, por mais complexa ou moderna que seja, pode compensar os efeitos de uma amostragem insuficiente.

3.2 Geração do Modelo Digital de Elevação (MDE)

Para Burrough (1986), o MDE simula qualquer representação digital de uma variação contínua do relevo no espaço, e são conhecidos diversos métodos de geração desses modelos. Fernandes e Menezes (2005) os divide em basicamente dois grupos: os métodos construídos a partir de grades regulares (GRID) e os métodos gerados a partir de malhas triangulares irregulares (TIN), por meio de diferentes algoritmos de interpolação. Baixo custo, rapidez e eficiência fazem com que os modelos de malha regular sejam mais utilizados. Porém, esse tipo de malha pode gerar perda de informação na reamostragem por interpolação, sendo mais apropriada para aplicações em pequena escala, onde a precisão absoluta requerida não é de extrema qualidade e as características da superfície não precisam ser exatamente determinadas.

Para identificar o método interpolador mais apropriado à representação da morfologia praial, um levantamento planialtimétrico com o sistema GPS foi realizado na área de estudo, a partir do qual foram gerados os MDE através de sete diferentes métodos interpoladores disponibilizados no software *ArcGis 9.3*, da

ESRI. Os métodos utilizados foram: *Inverse Distance Weighted* (IDW), Krigagem, *Spline*, *Triangulated Irregular Network* (TIN), *Topo to Raster* (TtR), *Trend* e *Vizinho Natural* (VN), cada qual com suas peculiaridades e características de representação dos dados coletados.

3.3 Controle de Qualidade dos Modelos

Com base na análise estatística das discrepâncias entre as altitudes interpoladas nos modelos e as altitudes de referência, nos pontos de controle, foram realizadas análises de acurácia, precisão e tendência, adotando como padrão as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional (BRASIL, 1984), que define o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC). O PEC é um indicador estatístico que define a exatidão de documentos cartográficos. Segundo o documento, 90% dos pontos isolados de altitude obtidos por interpolação de curvas de nível, quando testadas no terreno, não deverão apresentar erro superior ao PEC altimétrico estabelecido. O decreto apresenta as normas de classificação de um documento cartográfico, o qual pode ser classificado nas classes A, B ou C, segundo os critérios sintetizados na Tabela 1.

Segundo Lopez *et al.* (2007), independentemente do produto ser analógico ou digital, sua validação pelo PEC deve ser a mesma.

3.3.1 Tamanho da Amostra

O tamanho da amostra é importante para a adequada análise estatística. O cálculo do tamanho da amostra pode ser feito por (ZANARDI *et al.*, 2011; SANTOS *et al.*, 2008):

$$n = \frac{Z^2 \gamma^2 N}{(N-1)\epsilon_r^2 + Z^2 \gamma^2} \quad (1)$$

onde, Z é o intervalo de confiança, $\gamma = s / x$, s é o desvio padrão amostral, x é a média amostral, N é o tamanho da população, ϵ é o erro amostral, e ϵ_r é o erro amostral relativo ($\epsilon_r = \epsilon / x$).

Tabela 1: Padrão de Exatidão Cartográfica – PEC altimétrico (Brasil, 1984)

Classe	PEC	EP
A	1/2 da equidistância das curvas de nível	1/3 da equidistância das curvas de nível
B	3/5 da equidistância das curvas de nível	2/5 da equidistância das curvas de nível
C	3/4 da equidistância das curvas de nível	1/2 da equidistância das curvas de nível

Esse tamanho deve ser considerado estatisticamente suficiente para as análises se for menor que a quantidade de pontos de controle utilizada.

3.3.2 Análise da Acurácia

A análise de acurácia consiste em verificar, a partir de amostras de discrepâncias das altitudes, se o valor da média populacional estimada é estatisticamente menor do que o valor limite admissível em acurácia, de acordo com o PEC (SANTOS *et al.*, 2008; ZANARDI *et al.*, 2011). Pode-se estimar a média populacional a partir da média amostral, construindo um intervalo de confiança de $100(1-\alpha)\%$ e n graus de liberdade, aplicando-se:

$$\mu \leq \bar{x} + (t\alpha) \left(\frac{s}{\sqrt{n}} \right) \quad (2)$$

onde, \bar{x} é a média amostral; s é o desvio padrão amostral, α é o nível de significância, t_α é o valor tabelado na distribuição de *Student*, e n é o tamanho da amostra.

A avaliação da acurácia dessas informações de resíduos altimétricos se deu através do teste de hipótese:

$$H_0: \mu < X \quad (3)$$

$$H_1: \mu \geq X \quad (4)$$

onde, X é o erro máximo admissível em acurácia (1/2 da equidistância das curvas de nível para classe A, de acordo com o PEC).

Se o valor tabelado na distribuição de *Student* a $100(1-\alpha)\%$ de significância e n graus de liberdade for maior que a estatística de teste calculada, aceita-se a hipótese H_0 . Ou seja, pode-se dizer, com confiança de $100(1-\alpha)\%$, que a média populacional dos erros nas informações altimétricas avaliadas não deve ser maior do que o erro máximo admissível.

3.3.3 Análise da Precisão

A análise de precisão aponta a coerência interna dos elementos do MDE. Consiste em verificar, a partir de amostras de discrepâncias, se o valor do desvio padrão populacional estimado é estatisticamente menor do que o valor limite admissível em precisão, de acordo com o PEC (SANTOS *et al.*, 2008).

De forma semelhante à acurácia, estimou-

se também um intervalo de confiança de $100(1-\alpha)\%$ referente ao desvio padrão populacional:

$$\sigma \leq \sqrt{\frac{(n-1).s^2}{\chi_{1-\alpha}^2}} \quad (5)$$

onde, s é o desvio padrão amostral, $1-\alpha$ é o intervalo de confiança, χ é o valor tabelado na distribuição Qui-quadrado, e n é o tamanho da amostra.

Realiza-se o teste de hipótese para verificação da precisão dos dados de altimetria extraídos do MDE em estudo:

$$H_0: \sigma < \chi \quad (6)$$

$$H_1: \sigma \geq \chi \quad (7)$$

Dessa forma, se o valor calculado for inferior ao tabelado, não há motivos para rejeitar H_0 . Ou seja, pode-se dizer com confiança de $100(1-\alpha)\%$ que o desvio padrão populacional dos erros nas informações altimétricas estudadas não deve ser maior do que o erro máximo admissível.

3.3.4 Análise de Tendência

A análise de tendência consiste em verificar se a média das discrepâncias é estatisticamente nula, ou seja, se a amostra está livre de tendência (SANTOS *et al.*, 2008).

Realiza-se o seguinte teste de hipótese em relação à média amostral:

$$H_0: \bar{x} = 0 \quad (8)$$

$$H_1: \bar{x} \neq 0 \quad (9)$$

O cálculo da estatística t é dado por:

$$t\alpha/2 = \frac{\bar{x}}{s} \sqrt{n} \quad (10)$$

Como a hipótese alternativa H_1 é bilateral, aceita-se H_0 quando:

$$-t\alpha/2 \leq t \leq t\alpha/2 \quad (11)$$

onde, $t_{\alpha/2}$ e $-t_{\alpha/2}$ são os pontos $100_{\alpha/2}\%$ superior e inferior da distribuição t de *Student*.

A aceitação da hipótese nula indica que o modelo testado está livre de tendência. A existência de tendência em alguma direção

significa a ocorrência de problemas na modelagem, cujas causas podem ser as mais variadas (SANTOS *et al.*, 2008).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados exibidos foram obtidos na geração e na avaliação dos MDE gerados pelos sete métodos interpoladores utilizados no estudo de caso, realizado na Ilha Ponta do Tubarão (Figura 1).

4.1 Geração do Modelo Digital Elevação

O levantamento foi realizado pelo posicionamento GPS no modo relativo cinemático pós-processado, no mês de agosto de 2011. No processamento de dados foram admitidas apenas soluções com a fixação das ambiguidades como inteiros e um desvio padrão máximo de 5 cm nas linhas de base, as quais tiveram, no máximo, 3 km. A área de 540.136,07 m² foi levantada com 7115 pontos amostrais em 2h10min, resultando em uma densidade de 54,73 pontos/minuto ou de 132,48 pontos/hectare. Os desvios padrão estimados nos processamentos de dados GPS

foram de $0,012 \pm 0,002$ m em N, $0,020 \pm 0,002$ m em E, e $0,019 \pm 0,005$ m em h.

Durante o levantamento foram coletados 28 pontos de controle. A Figura 2a apresenta a LC com a distribuição espacial dos pontos amostrais utilizados na modelagem (pontos pretos), onde, se nota a boa distribuição espacial dos pontos de controle (triângulos vermelhos), abrangendo todas as porções da área. A Figura 2b ilustra o MDE da Ilha Ponta do Tubarão, gerado pelo método TIN e os pontos amostrais apresentados na Figura 2a. No modelo nota-se o padrão de distribuição espacial do relevo, com altitudes mais elevadas no setor Norte, submetido às ondas de mar aberto, e altitudes mais baixas no setor Sul, na região de estuário, como observado em Santos *et al.* (2011). O MDE permitiu, ainda, a modelagem e a representação de feições morfológicas típicas de zonas de praia, como dunas frontais, bermas, escarpas e perfis de praia. Além do método TIN, foram obtidos MDE através dos métodos IDW, Krigagem, *Spline*, *TtR*, *Trend*, e *Vizinho Natural*.

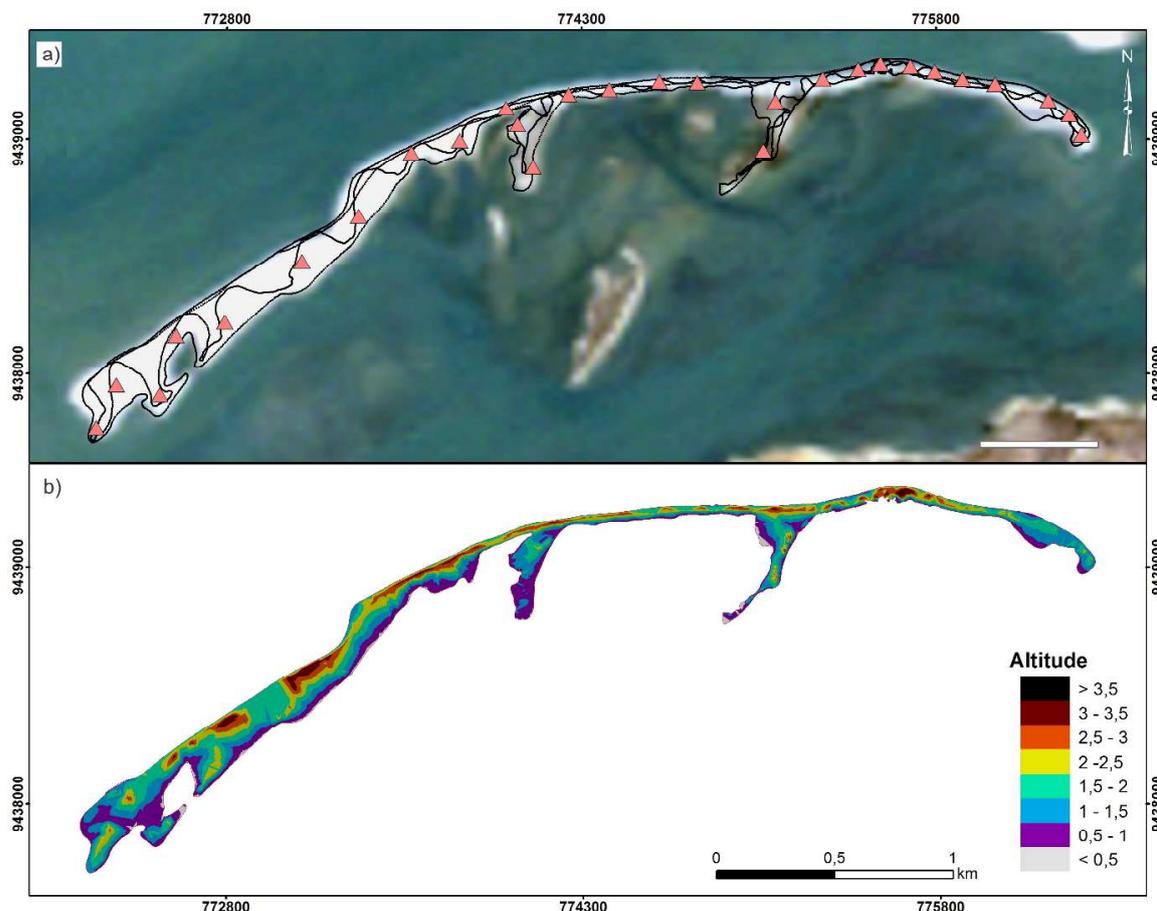


Fig. 2 - Levantamento realizado na IPT em agosto de 2011. a) Linha de Costa (LC) com distribuição espacial dos pontos amostrais (pontos pretos) obtidos pelo posicionamento GPS, sobrepostos a imagem Landsat 5 – TM (USGS, 2014). Os triângulos vermelhos correspondem aos pontos de controle. b) Ilustração do Modelo Digital de Elevação (MDE) obtido pelo método TIN e com uso

Tabela 2: Estatísticas das discrepâncias entre as altitudes geométricas dos modelos e as de referência

Métodos de Interpolação	Média	DP	Mínimo	Máximo	Amplitude	RMS
IDW	0,093	0,219	-0,346	0,610	0,956	0,234
Krigagem	0,132	0,301	-0,546	0,733	1,279	0,323
Spline	-0,010	0,103	-0,204	0,180	0,380	0,102
TIN	0,016	0,105	-0,1969	0,3156	0,513	0,104
Topo to Raster (TtR)	0,017	0,140	-0,242	0,266	0,508	0,139
Trend	0,357	0,461	-0,585	1,135	1,720	0,577
Vizinho Natural (VN)	0,059	0,136	-0,175	0,312	0,487	0,146

4.2 Avaliação dos Modelos Interpolados

A Tabela 2 apresenta as estatísticas básicas das discrepâncias entre as altitudes obtidas nos modelos interpoladores e as altitudes de referência, nos pontos de controle. De acordo com a Tabela 2, os métodos IDW, Krigagem e *Trend* tiveram discrepâncias bem superiores aos outros métodos de interpolação devido, principalmente, à suavização do terreno realizada pelos respectivos interpoladores. Assim, a superfície gerada falha, principalmente, em representar regiões onde há variações bruscas de altitude, como em escarpas de erosão e campos de dunas. Apesar disso, os MDE obtidos por esses métodos apresentam curvas de nível coerentes, visualmente.

Ainda na Tabela 2, nota-se que os métodos *Spline*, TIN, *TtR* e VN tiveram acurácia decimétrica (avaliada pela média das discrepâncias entre as altitudes geométricas dos modelos e as de referência), suficiente ao monitoramento costeiro em inúmeras aplicações. No entanto, o método *Spline* foi descartado da modelagem de zonas costeiras, pois, o modelo gerado foi incompatível com a realidade do terreno em alguns trechos da área de estudo, uma vez que gerou valores negativos em regiões com menor densidade de dados. Esse resultado tendencioso é reflexo, provavelmente, da forma como os dados foram adquiridos sobre a superfície de praia, em ziguezague. Dentre os modelos com acurácia decimétrica, o modelo TIN obteve melhor desempenho em relação àqueles gerados pelos métodos *TtR* e Vizinho Natural, com menor diferença entre altitudes medidas e interpoladas para 54% dos pontos de

controle. Para os três interpoladores citados, o modelo TIN obteve, ainda, menor erro médio (0,080) e menor erro acumulado (2,247). Devido às características peculiares do método, o algoritmo TIN consegue interpolar de forma coerente e precisa as mais relevantes feições morfológicas do terreno, entre elas campos de dunas, bermas, escarpas de berma e perfis de praia (declividade e extensão de estirâncio), possuindo ainda a vantagem de não suavizar o terreno em suas discontinuidades.

4.3 Classificação dos Documentos Cartográficos

A partir das estatísticas das discrepâncias entre as altitudes geométricas dos modelos e as de referência (Tabela 2) foram realizadas análises de acurácia, precisão e tendência dos MDE gerados pelos métodos TIN, *TtR* e VN, ou seja, os métodos que tiveram acurácia suficiente à modelagem da faixa de praia. Os MDE foram gerados na escala de 1:1.000 e com equidistância das curvas de nível de 0,50 m.

No cálculo do tamanho da amostra (Equação 1) necessária às análises de acurácia, precisão e tendência, foi utilizada a amostra inicial com os 28 pontos de controle levantados em campo. Adotou-se, então, um intervalo de confiança de 95% e um erro amostral de 6 cm, o que forneceu valores de n iguais a 11,7 para o método TIN, 20,9 para o *Topo to Raster*, e 19,8 para o vizinho natural. Uma vez que em todos os métodos o valor de n foi menor do que 28, a amostra inicial foi considerada estatisticamente suficiente para a realização das análises posteriores de acurácia, precisão e tendência.

Vale destacar que, de acordo com a Tabela 2, os métodos IDW, Krigagem e *Trend* obtiveram discrepâncias com média e desvio padrão muito elevados, o que exigiu amostras muito grandes. Assim, como o monitoramento costeiro deve ser realizado em, no máximo, três dias, tornou-se inviável a classificação de tais modelos. De qualquer forma, a baixa acurácia em relação aos demais modelos já havia inviabilizado seu uso nos monitoramentos costeiros.

A Tabela 3 apresenta os parâmetros calculados para as análises de acurácia, precisão e tendência (Equações 2 a 11) nos modelos TIN, TtR e VN na escala de 1:1000 para a classe A. Na análise de acurácia obteve-se valores de *t de Student* calculados ($t_{\text{calculado-TIN}} = -11,792$; $t_{\text{calculado-TtR}} = -8,807$; $t_{\text{calculado-VN}} = -7,451$) menores do que os valores de *t de Student* tabelados ($t(27; 0,10)_{\text{TIN}} = t(27; 0,10)_{\text{TtR}} = t(27; 0,10)_{\text{VN}} = -1,314$). Sendo assim, rejeita-se H_1 (Equação 4) e aceita-se a hipótese nula (Equação 3). Dessa forma, as médias populacionais dos erros nas informações altimétricas calculadas pela Equação (2) ($\mu_{\text{TIN}} < 4,2$ cm; $\mu_{\text{TtR}} < 5,2$ cm; $\mu_{\text{VN}} = 9,2$ cm) foram estatisticamente menores ou iguais ao erro admissível em acurácia (25 cm para a classe A).

Na análise de precisão, de acordo com a Tabela 3, os valores do Qui-Quadrado calculados para os métodos TIN e VN ($\chi^2_{\text{TIN}} = 10,716$; $\chi^2_{\text{VN}} = 17,978$) foram menores do que os valores de Qui-Quadrado tabelados ($\chi^2_{\text{TIN}} = \chi^2_{\text{VN}} = 18,114$), ou seja, rejeita-se H_1 (Equação 7) e aceita-se H_0 (Equação 6). Portanto, os desvios populacionais calculados na Equação 3 ($\sigma_{\text{TIN}} < 12,8$ cm; $\sigma_{\text{VN}} < 16,6$ cm) foram estatisticamente menores ou iguais ao erro admissível em precisão (16,7 cm para a classe A). Porém, o valor de Qui-Quadrado calculado para o modelo *TtR* ($\chi^2_{\text{(TtR;0,10)}} = 19,051$) foi maior do que o valor de Qui-Quadrado tabelado. Dessa forma, com 90% de confiança é possível dizer que o desvio populacional dos erros nas informações altimétricas, para esse método, é maior que o erro admissível em precisão para a classe A.

Assim, os testes de precisão do método *TtR* foram refeitos para a Classe B, onde, os valores calculados são apresentados na Tabela

4. De acordo com a Tabela 4, o interpolador *TtR* foi aceito nos testes de acurácia e tendência, como ocorreu com a classe A. Na análise de precisão, os valores do Qui-Quadrado calculado

($\chi^2_{\text{TtR}} = 13,230$) foram menores do que os valores de Qui-Quadrado tabelado ($\chi^2_{\text{TtR}} = 18,114$), ou seja, rejeita-se H_1 (Equação 7) e aceita-se H_0 (Equação 6). Portanto, tem-se 90% de confiança de que o desvio populacional dos erros nas informações altimétricas, calculado na Equação 3 ($\sigma_{\text{TtR}} < 17,1$ cm), foi estatisticamente menor ou igual ao erro admissível em precisão para a classe B (20 cm) na escala de 1:1000.

Na análise de tendência, os valores de *t de Student* calculados pela Equação 10 relativos aos interpoladores TIN ($t_{(27;0,05)} = 0,823$) e *TtR* ($t_{(27;0,05)} = 0,646$) estão entre o limite superior e inferior do *t de Student* tabelado (-1,703 a 1,703). Sendo assim, é aceita a hipótese nula, ou seja, os modelos gerados estão livres de tendência. No entanto, o valor de *t de Student* calculado para o interpolador VN ($t_{(27;0,05)} = 2,276$) não está contido no intervalo de *t de Student* tabelado, ou seja, o modelo produzido por esse interpolador não está livre de tendência, ocasionada por erros sistemáticos. Tal efeito pode ser minimizado pela subtração do valor do erro detectado ao valor de cada ponto observado no modelo gerado e, em seguida, os testes devem ser refeitos. Porém, se o valor da tendência detectada for inferior ao Erro Padrão definido pela norma brasileira, não é necessário removê-la, pois, não representa um “erro” significativo (LOPEZ *et al.*, 2007). O erro sistemático identificado no modelo gerado pelo interpolador VN foi -0,059 m, sendo bastante inferior ao erro padrão definido pela classe A (0,167 m). Nesse caso, não foi preciso remover a tendência identificada no modelo gerado.

Portanto, de acordo com a classificação de documentos cartográficos, o MDE gerado pelo método TIN foi o único completamente livre de tendência e classificado como classe A em termos de precisão e acurácia, para um nível de confiança de 90%. O método vizinho natural, apesar de ser classificado como classe A em precisão e acurácia, não esteve completamente livre de tendência, devido à média alta em relação ao desvio padrão, muito embora o erro sistemático identificado não seja significativo ou significativo? para a escala de 1:1.000. O método *TtR* foi classificado como classe A em acurácia e classe B em precisão, e livre de tendência. A classe B em precisão ocorreu devido ao alto desvio padrão em relação à média.

Tabela 3: Testes de acurácia, precisão e tendência para os interpoladores TIN, TtR (topo to raster) e VN (vizinho natural) para classe a na escala de 1:1000

	Interpoladores		
	TIN	TtR	VN
\bar{x} : Média	0,016	0,017	0,059
s : Desvio Padrão	0,105	0,140	0,136
n (amostral)	28	28	28
EP: Classe A	0,167	0,167	0,167
PEC: Classe A	0,250	0,250	0,250
μ	0,042	0,052	0,092
Σ	0,128	0,171	0,166
Teste de acurácia			
$t_{(27; 0,10)}$ (t tab)	1,314	1,314	1,314
$t_{\text{calculado}}$ (t calc)	-11,792	-8,807	-7,451
Análise	t calc < t tab Atende	t calc < t tab Atende	t calc < t tab Atende
Teste de Precisão			
$\chi^2_{(27; 0,10)}$ (χ^2 tab)	18,114	18,114	18,114
$\chi^2_{\text{(calculado)}}$ (χ^2 tab)	10,716	19,051	17,978
Análise	χ^2 calc < χ^2 tab Atende	χ^2 calc > χ^2 tab Não Atende	χ^2 calc < χ^2 tab Atende
Teste de Tendência			
$t_{(27; 0,05)}$ (t tab)	1,703	1,703	1,703
$t_{(27; 0,05)}$ (t calc)	0,806	0,643	2,276
Análise	t calc < t tab Atende	t calc < t tab Atende	t calc > t tab Não Atende

Tabela 4: Testes de acurácia, precisão e tendência para os interpoladores TIN, TtR (topo to raster) e VN (vizinho natural) para classe B na escala de 1:1.000

Interpolador: TtR	\bar{x} : Média	s : Desvio Padrão	n (amostral)	EP: Classe B	PEC: Classe B
	0,017	0,140	28	0,200	0,300
Teste de acurácia		Teste de Precisão		Teste de Tendência	
$t_{(27; 0,10)}$ (t tab)	1,314	$\chi^2_{(27; 0,10)}$ (χ^2 tab)	18,114	$t_{(27; 0,05)}$ (t tab)	1703
$t_{\text{calculado}}$ (t calc)	-10,696	$\chi^2_{\text{(calculado)}}$ (χ^2 tab)	13,230	$t_{(27; 0,05)}$ (t calc)	0,643
Análise	t calc < t tab Atende	Análise	χ^2 calc < χ^2 tab Atende	Análise	t calc < t tab Atende

5. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo identificar o método interpolador mais adequado para ser utilizado na geração de MDE de superfícies praias obtidas pelo posicionamento GPS. Para isso, como estudo de caso, foi realizado o

levantamento GPS no modo relativo cinemático pós-processado na Ilha Ponta do Tubarão, de aproximadamente 5 km de extensão, localizada no Litoral Setentrional do Estado do Rio Grande do Norte.

Sete interpoladores disponíveis no soft-

ware ArcGis 9.3 (da ESRI) foram avaliados por meio de 28 pontos de controle coletados aleatoriamente no terreno, e que não foram utilizados na interpolação. Três desses métodos (IDW, Krigagem e *Trend*) apresentaram erros elevados em relação aos demais, além de evidente falta de coerência visual, o que justificou o descarte na primeira análise. O modelo gerado pelo método *Spline* apresentou baixas discrepâncias nos pontos de controle, porém, o MDE gerado exibiu valores negativos em regiões em que havia dados em menor quantidade, o que explicou sua rejeição. Para os modelos que obtiveram melhor acurácia (decimétrica) e se apresentaram em conformidade com a realidade do terreno (TIN, TtR e Vizinho Natural), foram feitas análises estatísticas de acurácia, precisão e tendência, nos modelos na escala de 1:1.000 e com equidistância vertical de 0,5 m (suficientes no modelamento de praias arenosas), adotando como padrão as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional.

O modelo gerado pelo método TIN foi classificado estatisticamente como de classe A em acurácia e precisão, além de estar livre de tendência (erros sistemáticos). O modelo do método VN, embora tenha sido classificado na classe A em acurácia e precisão, atenuou feições geomorfológicas e apresentou tendência, ainda que insignificante para a escala adotada neste trabalho. O modelo do método TtR foi classificado com classe A em acurácia e esteve livre de tendência. No entanto, foi classificado como classe B em precisão, devido ao alto desvio padrão em relação à média.

Portanto, os resultados obtidos mostraram que o interpolador TIN foi o mais adequado para geração de MDE em zonas costeiras com praias arenosas que apresentam intensa dinâmica sedimentar sazonal, além de interanual e decadal. Dessa forma, justifica-se o emprego dessa técnica de interpolação na modelagem digital de elevação de superfícies costeiras do Litoral Setentrional do RN, que tem contribuído para o conhecimento da dinâmica costeira desse trecho de litoral.

AGRADECIMENTOS

A pesquisa teve apoio do Projeto MOLECO de “Monitoramento das Mudanças Ambientais e da Influência das Forçantes Hidrodinâmicas

na Morfodinâmica Praial no Campo de Serra-Macau na Bacia Potiguar” e do Projeto CRONALOG de “Evolução das Ilhas Barreiras Como Subsídio ao Estudo Ambiental e de Análogos a Reservatórios de Hidrocarbonetos”, ambos subprojetos da Rede Cooperativa N-NE de Pesquisa no Monitoramento Ambiental de Áreas sob a Influência da Indústria do Petrolífera (REDE 05- PETROMAR, CTPETRO-FINEP/PETROBRAS/ CNPq). Bolsa de pesquisa foi concedida pela Agência Nacional de Petróleo (ANP) pelo programa PRH-22.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARO, V. E.; SANTOS, M. S. T.; SOUTO, M. V. S. **Geotecnologias Aplicadas ao Monitoramento Costeiro: Sensoriamento Remoto e Geodésia de Precisão**. 1ª Ed. Natal, Edição dos Autores, 118p, 2012.

BLITZKOW, D.; MATOS, A.C.O.C.; CINTRA, J.P. Digital Terrain Model Evaluation and Computation of the Terrain Correction and Indirect Effect in South America. **Geoacta**, v. 34, p. 59-75, 2009.

BRASIL, Decreto nº 89.817 de 20 de julho de 1984. Estabelece as instruções reguladoras e normas técnicas da Cartografia Nacional. **Diário Oficial**, Brasília.

BURROUGH, P. A. **Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment**. New York: Oxford University Press, 193 p., 1986.

FERNANDES, M. C. & MENEZES, P. M. L. Comparação entre Métodos para Geração de MDE para Obtenção de Observações em Superfície Real no Maciço da Tijuca-RJ. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 57, p.154-161, 2005.

GRIGIO, A. M.; SOUTO, M. V. S.; CASTRO, A. F.; AMARO, V. E.; VITAL, H.; DIODATO, M. A. Method of analysis of the coastline evolution based in remote sensing and geographical information system products: Guamaré District Rio Grande do Norte - Northeast of Brazil.. **Journal of Coastal Research**, v. 42, p.412- 421, 2005.

LOPEZ, F. J. A.; GORDO, A. D. J. A.; NERO, M. A. Análisis de Algunas Metodologías de

- Evaluación de la Componente Posicional. **Topografía y cartografía: Revista del Ilustre Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos en Topografía**, v. 24, p. 32-45, 2007.
- SANTOS, M.S.T.; SILVA, E.B.S.; SOUZA, A.M.; TEIXEIRA, W.L.E.; SOUSA SCHMIDT, A.C.P.; FRANCELINO, A.V.M.; SABADIA, J.A.B.; FILHO, F.P.L. (2008). Geração e análise estatística de modelo digital de elevação (MDE) com dados de GPS em tempo real (GPS/RTK). **Revista Estudos Geológicos**, v. 18, p. 94-110, 2008.
- SANTOS, M. S. T. & AMARO, V. E. Rede Geodésica para o Levantamento Costeiro do Litoral Setentrional do Rio Grande do Norte. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 17, n. 4, p. 571-585., 2011.
- SANTOS, M. S.T.; AMARO, V.E.; SOUTO, M.V.S. Metodologia geodésica para levantamento de Linha de Costa e Modelagem Digital de Elevação de praias arenosas em estudos de precisão de geomorfologia e dinâmica costeira. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 63, p. 663-681, 2011.
- SANTOS, M.S.T.; AMARO, V.E.; FERREIRA, A.T.S.; SANTOS, A.L.S. Mapeamento de precisão da dinâmica costeira de curta duração em áreas de alta taxa de erosão no Nordeste do Brasil. **Revista de Geologia**, v. 25, p. 7-19, 2012.
- SOUTO, M. V. S.; CASTRO, A. F.; GRIGIO, A. M.; AMARO, V. E.; VITAL, H. Multitemporal analysis of geoenvironmental elements of the coastal dynamics of the region of the Ponta do Tubarão, City of Macau/RN, on the basis of remote sensing products and integration in GIS. **Journal of Coastal Research**, v.39, p. 1618-1621, 2011.
- USGS - *United States Geological Survey*. "EarthExplorer". Disponível em: <http://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 02/26/2014.
- ZANARDI, R. P.; SILVIA B. A.; DE SOUZA, S. F.; MARANHÃO, M. R. A.; DE SOUZA FILHO, C. R. (2011). DTM generation from a stereo pair acquired by the China–Brazilian Earth Resources Satellite (CBERS-2) and quality control of the altimetric information. **International Journal of Remote Sensing**, v.32, p. 4683-4694, 2011.