



Revista Brasileira de Cartografia (2011) N<sup>o</sup> 63/5: 663-681  
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto  
ISSN: 1808-0936

## **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**

*Geodetic Methodology for Survey of Coastline and Digital Elevation Modeling of Sandy Beachs in Studies of Precision of Geomorphology and Coastal Dynamics*

**Marcelo Soares Teles Santos, Venerando Eustáquio Amaro  
& Michael Vandesteem Silva Souto**

**Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN**

**Departamento de Geologia – DG**

Campus Universitário, CEP 59078-970, Natal/RN

mstsantos@yahoo.com.br

amaro@geologia.ufrn.br

michael.s@mvbrasil.com

*Recebido em 30 Junho, 2011/ Aceito em 18 Setembro, 2011  
Received on June 30, 2011/ accepted on September 18, 2011*

### **RESUMO**

Este trabalho apresentou a metodologia geodésica desenvolvida para o levantamento, geração e avaliação de Linhas de Costa (LC) e Modelos Digitais de Elevação (MDE) de litorais arenosos, e um estudo de caso realizado no sistema de ilhas barreiras com praias arenosas e canais de maré intermitentes do Litoral Setentrional do Estado do Rio Grande do Norte (RN), Nordeste do Brasil, sensível ambientalmente e caracterizado pela intensa erosão/acresção costeira sob as atividades petrolíferas. A metodologia permitiu a determinação de LC e MDE a partir de coordenadas geodésicas e de altitudes ortométricas com precisão de poucos centímetros em relação ao Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), a partir do posicionamento e da altimetria por GPS no modo relativo. As principais características da metodologia proposta são a precisão, o uso de indicador de LC específico para análises de dinâmica costeira e o emprego de referenciais geodésicos (geográfico e altimétrico) unívocos, fixos e relativamente estáveis no tempo. A metodologia aplicada permite a repetição dos levantamentos nas mesmas condições de maré e com os mesmos referenciais geodésicos, sendo adequada para a comparação multitemporal de levantamentos realizados no domínio espacial e temporal e de grande potencial nos estudos de análise da dinâmica costeira (erosão/acresção sedimentar) de precisão.

**Palavras chaves:** Linha de Costa, MDE, Monitoramento Costeiro, Nordeste do Brasil.

### **ABSTRACT**

This paper presents a geodetic methodology developed for survey, generation and assessment of coastline (CL) and Digital Elevation Models (DEM) of sandy littoral and a case study in a barrier island system of sandy beaches and intermittent tidal channels of the Northern Coast of Rio Grande do Norte State, Northeast Brazil, environmentally sensitive and characterized by intense coastal erosion/accretion in oil activities. The methodology allowed the

determination of CL and DEM from geodetic coordinates and orthometric heights with accuracy of a few centimeters regarding to the Brazilian Geodetic System (BGS), from positioning and leveling by GPS on relative way. The main features of the proposed method are the precision, the use of CL indicator specific for analysis of coastal dynamics and the use of geodetic references (geographic and altimetric), which are univocal, fixed and relatively stable over time. The applied methodology allows the repetition of surveys in same conditions of tide and with same geodetics references, what is a suitable way for multitemporal comparison of surveys conducted in space and time domain and of great potential in studies of precision coastal dynamics (sedimentary erosion/ accretion) analysis.

**Keywords:** Coastline (CL), Digital Elevation Model (DEM), Geodetic Survey, Coastal Monitoring.

## 1. INTRODUÇÃO

Linhas de Costa (LC) e Modelos Digitais de Elevação (MDE) de praias arenosas são informações importantes nos estudos de dinâmica costeira em distintas aplicações. Por exemplo, a comparação multitemporal entre esses elementos pode permitir a identificação e a mensuração das variações temporais superficiais e volumétricas ocorridas nas LC e nas superfícies de praia, o cálculo das áreas e volumes de erosão/acresção, além da orientação e do transporte de sedimentos. Essas informações integradas podem ser utilizadas em questões relacionadas à evolução costeira, tais como na alimentação dos modelos de prognósticos de LC, na identificação das zonas de risco à erosão costeira, no auxílio aos estudos de uso e ocupação sustentável do solo em áreas de intensa dinâmica costeira (erosão/acresção) sobre atividades antrópicas, na análise da elevação do nível do mar e de fenômenos climáticos globais como o *El Niño* e a *La Niña* (KLEMAS, 2011; COWART *et al.*, 2010; GONÇALVES *et al.*, 2010; ROCHA *et al.*, 2009; BAPTISTA *et al.*, 2008; ESTEVES *et al.*, 2006; MOORE *et al.*, 2006; BOAK & TURNER, 2005; SOUTO *et al.*, 2004).

No monitoramento de ecossistemas costeiros, a metodologia utilizada na determinação das LC e dos MDE deve ser definida em função dos objetivos a serem atingidos, do nível de detalhe a ser monitorado, da extensão da área e da amplitude temporal. Tradicionalmente, as imagens de satélites têm sido utilizadas com bastante eficiência no monitoramento de variações de LC em várias regiões do planeta, principalmente em escala temporal decadal, em áreas de grande extensão (BOAK & TURNER, 2005) e com o escopo geral de conhecer o comportamento histórico e de tendência de variação da LC. Nesse caso, como as variações na LC são relativamente amplas, as condições de maré e as resoluções espaciais e

temporais da maioria dos sensores orbitais atuais não interferem substancialmente nos resultados. No entanto, na escala de tempo interanual, os processos erosivos e acrescionais ocorrem conforme os ciclos anuais de construção e destruição das praias e modificam a morfologia da costa sazonalmente, em curto intervalo de tempo. Assim, o monitoramento das pequenas variações costeiras sofre influência das condições de maré e da precisão posicional da LC, o que requer levantamentos com boa precisão e alta resolução espaço-temporal, além do indicador de LC adequado. Se realizado de maneira sistemática no tempo, pode ser utilizado no estudo dos efeitos da atuação dos agentes dinâmicos costeiros (clima, ventos, ondas e correntes) sobre as variações temporais das LC e das superfícies de praias e no auxílio ao entendimento das causas e consequências da erosão costeira.

O objetivo deste trabalho foi de apresentar a metodologia geodésica desenvolvida para o levantamento da LC e a modelagem digital de elevação de litorais arenosos para estudos de precisão da dinâmica costeira (erosão/acresção sedimentar). Os métodos geodésicos utilizados - posicionamento e altimetria por GPS (*Global Positioning System*) - permitiram a determinação das coordenadas geodésicas e das altitudes ortométricas dos pontos amostrais definidores das LC e dos MDE, com precisão de poucos centímetros em relação aos referenciais planimétrico e altimétrico adotados oficialmente pelo Sistema Geodésico Brasileiro (SGB). Para isso, foram utilizadas, como referência, estações geodésicas da Rede GPS do Litoral Setentrional do RN (RGLS), implantada na área de estudo para fornecer linhas de base curtas ao posicionamento GPS pelo método relativo cinemático. O indicador de LC foi definido como o limite de espraiamento das ondas na face de praia na maré de quadratura em preamar, mensuradas *in situ*. Para avaliar a metodologia proposta, um estudo de caso é apresentado em um

trecho com 64.956,76 m de perímetro e 2.763.721,79 m<sup>2</sup> de área, localizado no sistema de praias arenosas, ilhas barreiras e canais de maré intermitentes no Litoral Setentrional do RN, Nordeste do Brasil, ambientalmente sensível e caracterizado pela intensa erosão/acresção sedimentar que interfere nas instalações das atividades petrolíferas.

Devido aos benefícios da precisão, eficiência, rapidez e baixo custo, o GPS já foi utilizado e avaliado em monitoramentos costeiros em algumas partes do mundo (ROCHA *et al.*, 2009; BAPTISTA *et al.*, 2008; TANAJURA, 2008; ESTEVES *et al.*, 2006; MOORE *et al.*, 2006). O grande problema encontrado nas diversas metodologias aplicadas está na adoção de diversos indicadores de LC e na indefinição dos referenciais geodésicos planimétrico e altimétrico, o que dificulta ou inviabiliza a comparação dos resultados de pesquisas realizadas em épocas diferentes (domínio temporal), mesmo em uma mesma área (domínio espacial). Assim, em termos metodológicos, este trabalho apresentou contribuições importantes ao monitoramento costeiro de precisão, pois apresenta método geodésico, indicador de LC e referenciais geodésicos adequados para análises multitemporais no domínio temporal e espacial. Os modelos possuem precisão decimétrica, compatível com as dimensões das variações sedimentares ocorridas na escala de tempo intra anual; referenciais geodésicos planimétrico e altimétrico unívocos, fixos e relativamente estáveis no tempo, que permitem a repetição dos levantamentos sempre nos mesmos referenciais; e indicador de LC que representa o alcance máximo da linha d'água sobre o perfil de praia (preamar) em uma maré específica, que permite a repetição dos levantamentos sempre nas mesmas condições de maré.

Na metodologia proposta, o uso do GPS como fonte de dados permitiu obter MDE georreferenciados e com altitudes relacionadas ao SGB. Por ser um produto digital, a visualização espacial dos elementos do modelo independe da escala, o que permite análises micromorfológicas em áreas de grandes extensões, através de programas computacionais específicos. Por ser um produto georreferenciado, o modelo fornece a localização geográfica das feições geomorfológicas presentes na área, além de suas inter-relações espaciais, o que o torna útil na compreensão das

variações morfológicas no domínio espacial, auxiliando na compartimentação morfológica. Por ser um produto relacionado ao SGB, as altitudes das feições morfológicas podem ser comparadas com as de outros modelos na área de estudo ou em outras áreas, além de fornecer boa precisão altimétrica em relação ao nível médio dos mares. O georreferenciamento permite ainda a comparação multitemporal dos modelos digitais, o que possibilita a análise da morfodinâmica praial no domínio temporal, no mesmo nível de detalhe em que as feições morfológicas foram modeladas.

## **2. ÁREA DE ESTUDO, REDE GEODÉSICA E MODELO GEOIDAL DE REFERÊNCIA**

Este item apresenta a área do estudo de caso, a rede geodésica de referência que serviu de apoio básico aos levantamentos geodésicos planialtimétricos, e o modelo geoidal utilizado na altimetria por GPS.

### **2.1. Área de estudo**

A área de estudo é composta por um sistema de ilhas barreiras arenosas com praias oceânicas e canais de maré, localizado no Litoral Setentrional do Estado do Rio Grande do Norte (RN), entre os municípios de Macau e Guamaré, numa faixa de aproximadamente 30 km de litoral. A Figura 1 apresenta o mapa geomorfológico da área de estudo com a distribuição espacial dos quatro trechos selecionados para os levantamentos, a Praia da Soledade, a Ilha da Ponta do Tubarão, a Ilha do Fernandez e a Praia do Minhoto, assim como os canais de maré adjacentes. Como referência à localização espacial dos trechos, a Figura 1 apresentou as nove estações de referência da RGLS. O sistema é caracterizado pela intensa ação de processos costeiros, tais como transporte eólico e litorâneo, erosão generalizada, alterações no balanço de sedimentos, variações na LC, abertura e fechamento de canais de marés e formação de ilhas barreiras. (SOUTO *et al.*, 2004; GRIGIO *et al.*, 2005).

A intensa geodinâmica tem provocado sérios problemas às atividades socioeconômicas presentes na área, além de se configurar como um potencial problema ambiental. Na Praia da Soledade, por exemplo, o avanço da LC em direção ao continente tem ameaçado as instalações dos campos petrolíferos de Serra e de Macau (da

PETROBRAS), tais como as unidades de bombeamento, conhecidos como cavalos de petróleo, queimadores de gás, torres eólicas e dutos expostos de petróleo e gás; em certos trechos da LC já ocorreu implantação de estruturas de contenção de erosão e dunas artificiais. Na Praia do Minhoto, em determinadas épocas do ano, a erosão costeira tem exposto os dutos de petróleo e emissários de efluentes que interligam o Campo Petrolífero de Guamaré com as plataformas de petróleo a mar aberto, configurando-se como um risco iminente ao meio ambiente e à segurança dos moradores locais e banhistas; na época, a pista de dutos foi instalada a 2 m de profundidade. Ainda, a intensa dinâmica tem provocado a erosão do sistema de ilhas barreiras que protegem a Praia da Soledade e os estuários de Barreiras e Diogo Lopes do impacto das ondas de mar aberto, sendo importantes na contenção da erosão costeira nesses trechos.

## 2.2. Rede geodésica de referência

A RGLS implantada e mantida pelo Laboratório de Geoprocessamento do Departamento de Geologia da UFRN (GEOPRO/DG/UFRN) é constituída por nove estações geodésicas distribuídas em aproximadamente 30 km

de litoral. Como ilustra a Figura 1, as estações foram distribuídas próximas aos principais trechos de interesse aos monitoramentos costeiros, ou seja, dunas móveis e zonas de praia, apresentando a seguinte distribuição: três estações no trecho da Praia da Soledade: a EST-01 no Campo Petrolífero Macau, a EST-02 no Campo Petrolífero Serra, e a EST-03 na Falésia de Chico Martins; uma estação na Ilha Ponta do Tubarão, a EST-04; uma estação na Ilha do Fernandez, a EST-05; uma estação no centro da área, a EST-06; e três estações na Praia do Minhoto, a EST-07 no extremo oeste do trecho, a EST-08 no meio do trecho e a EST-09 no extremo leste do mesmo. A distribuição geográfica das estações que formam a RGLS foi escolhida visando possibilitar a formação de linhas de base curtas entre elas e as trajetórias a serem percorridas (LC) pelo método de posicionamento relativo cinemático (a distância máxima de 3,5 km ocorre na Ilha da Ponta do Tubarão).

Em cada estação da rede foram determinadas as coordenadas geodésicas (latitude, longitude e altitude geométrica) e a altitude ortométrica referenciadas ao SGB. As coordenadas geodésicas foram determinadas com o posicionamento GPS pelo método relativo estático a partir das estações RNNA (Natal/RN) e RNMO (Mossoró/RN) da

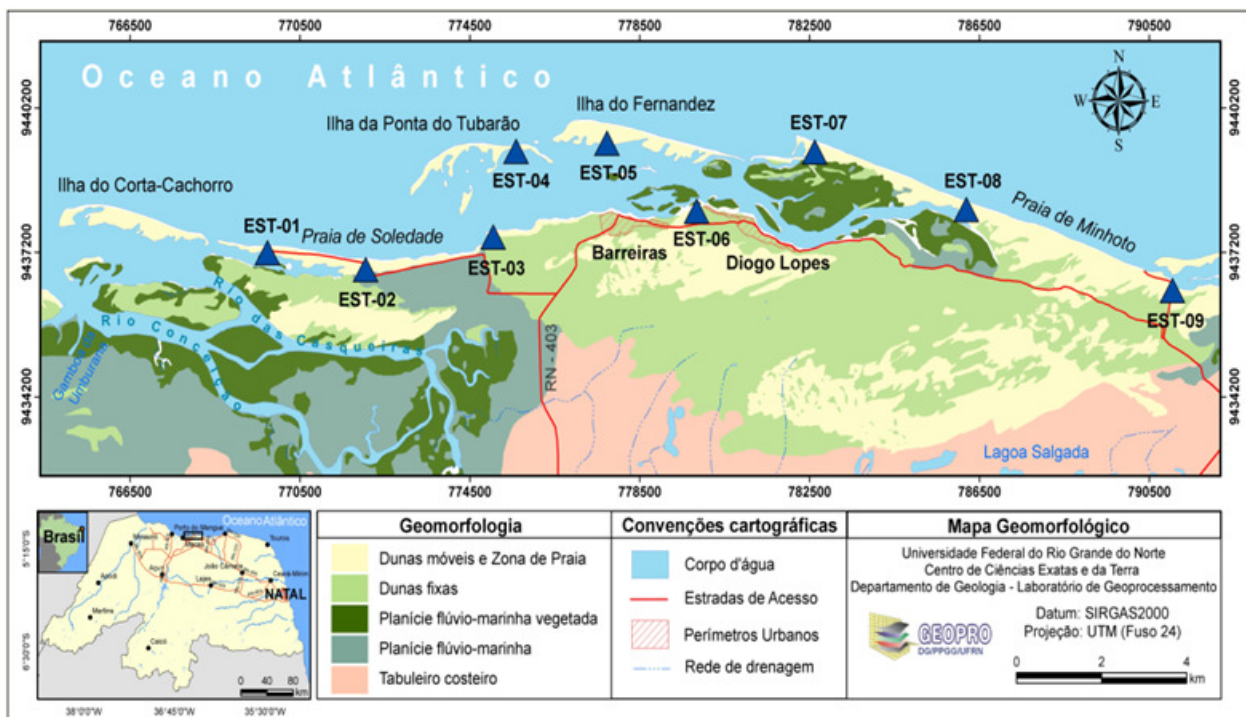


Fig. 1 - Mapa geomorfológico da área de estudo (SILVA et al., 2010), com a distribuição espacial dos 4 trechos selecionados para o monitoramento (Praia de Soledade, Ilha da Ponta do Tubarão, Ilha do Fernandez, e Praia de Minhoto) e das 9 estações da RGLS (EST-01 a EST-09).

Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do GPS (RBMC). As altitudes ortométricas foram determinadas com a altimetria por GPS no modo relativo, a partir das coordenadas geodésicas e usando, como referências, 5 Referências de Nível (RN) da Rede Altimétrica Fundamental do Brasil (RAFB) localizadas nas proximidades da área de estudo e o modelo geoidal disponibilizado do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), modelo MAPGEO2004 (IBGE, 2011). Como resultados dos processamentos de dados GPS, as coordenadas geodésicas das estações da rede tiveram erros padrões com média de 1,6 cm em E, 2,8 cm em N e 4,5 cm em h em relação às estações da RBMC do SGB. As altitudes ortométricas tiveram erros com média de 5,3 cm em relação às RN da RAFB do SGB. Mais informações sobre a RGLS podem ser encontradas em Santos (2011).

### 2.3. Modelo geoidal de referência

Na altimetria por GPS foram utilizadas as alturas geoidais obtidas no modelo geoidal desenvolvido e disponibilizado pelo IBGE em conjunto com diversas instituições do Brasil, o MAPGEO2004 (IBGE, 2011). O modelo geoidal, que possui resolução espacial de 5' de arco, foi determinado pela fórmula de Stokes, usando dados do modelo geopotencial EGM96, dados gravimétricos terrestres e oceânicos e dados topográficos na forma digital. No modelo, as alturas geoidais foram obtidas a partir das coordenadas geodésicas dos pontos de interesse, em SIRGAS2000. O programa pode ser obtido no site do IBGE (IBGE, 2011).

Para avaliar os erros absolutos e relativos obtidos do modelo geoidal (MAPGEO2004), Santos (2011) utilizou como referência as alturas geoidais geométricas (diferença entre a altitude geométrica e ortométrica em um ponto qualquer) obtidas pelo posicionamento GPS em cinco RN da área de estudo. Na avaliação do erro absoluto, as cinco alturas geoidais gravimétricas foram comparadas com as respectivas alturas geoidais geométricas, e apresentaram as seguintes informações estatísticas: média de -0,440 m, desvio padrão de 0,053 m, mínimo de -0,514 m e máximo de -0,380 m. Na avaliação do erro relativo, as cinco RN geraram dez diferenças de alturas geoidais gravimétricas, as quais, comparadas com as respectivas diferenças de alturas geoidais

geométricas, apresentaram as seguintes estatísticas: média de 6,7 cm, desvio padrão de 3,7 cm, mínimo de 1,9 cm e máximo de 13,4 cm. A distância média entre as RN foi de 25 km, com mínimo de 13 km e máximo de 44 km. Em termos relativos, os erros obtidos foram de 1 mm/km a 5 mm/km. Portanto, para as linhas de base utilizadas nos levantamentos, menores do que 3,5 km, tem-se um erro nominal de 3,5 mm a 17,5 mm nas diferenças de alturas geoidais. Mais detalhes sobre avaliação de modelos geoidais podem ser encontrados em Santos (2011), Kotsakis & Sideris (1999) e Featherstone *et al.* (1998).

## 3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Para que LC e MDE possam ser utilizadas no monitoramento costeiro intra anual (sazonal) devem ter as seguintes características: boa precisão, compatível com as dimensões das principais feições morfológicas modeladas nas zonas de praia e das variações sedimentares ocorridas na escala de tempo intra anual; referencial geodésico unívoco, fixo e relativamente estável no tempo, que permita a repetição dos levantamentos sempre nos mesmos referenciais, a comparação dos resultados de pesquisas realizadas em épocas e áreas diferentes (domínios temporal e espacial), e a conversão para outros tipos de referenciais geodésicos; e indicador de LC que represente o alcance máximo da linha d'água sobre o perfil de praia (preamar) em uma maré específica, que permita a repetição dos levantamentos sempre nas mesmas condições de maré e leve em consideração a interação entre as ondas incidentes e a morfologia da praia, variáveis ao longo do ano em função dos períodos construtivo (acresção sedimentar) e destrutivo (erosão sedimentar) das praias. Tais características serão consideradas na metodologia apresentada a seguir.

### 3.1. Aquisição dos dados GPS

A aquisição de dados para a geração de um MDE de áreas costeiras deve ser feita em duas etapas: o levantamento da LC, que define o limite externo do modelo, e o levantamento das superfícies de praia, que definem a área interna ao modelo.

#### 3.1.1. Método de Posicionamento GPS

Os levantamentos das LC e das superfícies de praia foram realizados com o posicionamento GPS pelo método relativo cinemático, no qual dois receptores coletam dados, simultaneamente, durante

um determinado intervalo de tempo, sendo um instalado em uma estação de referência (estação base, de coordenadas conhecidas) e o outro nos pontos de interesse (estações móveis) (MONICO, 2007; SEEBER, 1993). Os dados rastreados são armazenados nos receptores e, posteriormente, transferidos para o computador, onde são processados e ajustados. O resultado dos processamentos dos dados são as coordenadas geodésicas (latitude, longitude e altitude geométrica) de cada ponto levantado. Os receptores utilizados foram do modelo *Trimble R3*, que rastreiam observações da fase da onda portadora na frequência L1. Para linhas de base curtas, de até 20 km, o sistema R3 possui precisão nominal horizontal de 5 mm + 1 ppm e vertical de 5 mm + 2 ppm. Por exemplo, para uma distância de 5 km, os erros estimados são de 10 mm na horizontal e 15 mm na vertical. Como referências aos posicionamentos, foram utilizadas as estações da RGLS (ver Item 2.2), que forneceram linhas de base curtas (menores do que 3,5 km) em toda a área de estudo.

### 3.1.2. Caminhamento com veículo quadriciclo

Para aumentar a produtividade na aquisição de dados e viabilizar o levantamento de extensas áreas em reduzidos intervalos de tempo, 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 com o 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, o caso de algumas dunas vegetadas e paleomangues, 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 intervalo de gravação de dados de 1s, a qual proporciona uma densidade de pontos com 3.600 pontos/hora. Assim, ao final do percurso feito pelo quadriciclo ou a pé, foi gerada uma quantidade de pontos com distribuição contínua, alta densidade (pontos/área) e precisão.

No entanto, o uso do quadriciclo provoca uma fonte de erro adicional à modelagem digital de

elevação, o erro de verticalidade do bastão da antena. Esse erro ocorre devido ao desvio do bastão em relação à vertical, provocado pela inclinação do terreno. Ocorre na componente horizontal e na vertical e é proporcional ao comprimento do bastão para um mesmo ângulo de inclinação. Para quantificar o erro associado ao desvio da vertical, Baptista *et al.* (2008) considerou uma face de praia com 5° de inclinação em relação ao plano horizontal de referência. Atentando que o veículo transporta uma antena a uma altura de 1,5 m relativamente ao solo, pode-se esperar erros de 0,13 m em planimetria e 0,006 m em altimetria. Para as aplicações deste trabalho esses erros podem ser considerados desprezíveis, pois são absorvidos pelas outras fontes de erros da modelagem, apresentadas no Item 3.4. No entanto, para tentar evitá-lo, o levantamento é realizado por dois operadores: o primeiro pilota o quadriciclo e o segundo verifica a verticalidade do bastão por meio de um nível de bolha.

### 3.1.3. Levantamento de linhas de costa

A LC foi definida como o limite do espraiamento das ondas na face de praia submersa na maré em preamar, ou seja, o alcance máximo da linha d'água. No levantamento, foram coletados pontos topográficos planialtimétricos (com o posicionamento relativo cinemático do GPS) ao longo dos perfis longitudinais que a definem, com o caminhamento seguindo as marcas mais recentes da LC, indicadas tanto por sujeiras deixadas pelas marés quanto pela diferença de umidade entre as areias seca e molhada. Para permitir a melhor identificação das marcas definidoras da LC, foram levantadas logo após o pico de maré alta, com a maré em vazante. Com o objetivo da comparação multitemporal para aplicações em estudos de dinâmica sedimentar, as LC são levantadas sempre na mesma maré, na mesma época e com a mesma duração. A maré de quadratura foi definida como referência em função da logística de campo, visto que na maré de sizígia não seria possível o acesso a certos trechos da área, e ao fato da amplitude da maré ser menor na quadratura. O levantamento de campo foi realizado em três dias consecutivos: um dia antes, um dia depois e exatamente no dia da maré de quadratura, em função da extensão da área a ser medida e por permitir uma variação relativa mínima na posição da LC em função da variação da maré. As datas dos levantamentos foram

definidas com base na tábua de maré, disponibilizada na internet pelo Banco Nacional de Dados Oceanográficos (BNDO) do Centro de Hidrografia da Marinha (CHM) da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN).

### 3.1.4. Levantamento de superfícies de praia

Os levantamentos das superfícies de praia foram realizados logo após o levantamento das LC. O intuito foi coletar pontos topográficos planialtimétricos (com o posicionamento relativo cinemático do GPS) em perfis representativos das feições morfológicas geralmente encontradas nas áreas costeiras, que incluem toda a praia emersa, ou seja, a face de praia emersa, a crista do berma e o berma até uma feição morfológica com variação topográfica significativa do terreno, tal como campos de dunas. Os perfis foram coletados com caminhamentos ao logo das feições morfológicas e cruzando-as, podendo ser orientados nas formas longitudinais, transversais e/ou inclinados em relação às LC. Devido às significativas mudanças sazonais na morfologia praias, torna-se difícil, senão impossível, seguir perfis pré-definidos em levantamentos anteriores, como observado por Baptista *et al.* (2008). Assim, o operador de campo teve a liberdade de escolha dos pontos topográficos a serem levantados em cada campanha de observação. No entanto, a amostra de pontos topográficos deve ser compatível, em número e distribuição espacial, com as características morfológicas do terreno e da precisão requerida para sua modelagem. Quanto mais complexa a feição morfológica, mais pontos topográficos devem ser coletados, para evitar a deficiência de dados (subamostragem), que pode gerar modelos pobres com tendência a suavizar o terreno (MATOS, 2005). Por outro lado, deve-se evitar a redundância de dados (superamostragem) que, na maioria dos casos, não acrescenta informação ao modelo e encarece desnecessariamente o levantamento. Segundo Matos (2005), nenhuma metodologia, por mais complexa ou moderna que seja, pode compensar os efeitos de uma amostragem insuficiente.

### 3.2. Processamento dos dados

Como as altitudes ortométricas foram determinadas a partir das geométricas (obtidas por GPS), o processamento dos dados coletados em

campo consistiu em duas etapas: 1) determinação das coordenadas geodésicas; e 2) determinação das altitudes ortométricas.

#### 3.2.1. Determinação das coordenadas geodésicas

As coordenadas geodésicas (latitude, longitude e altitude geométrica) e os erros padrões dos pontos levantados em campo foram obtidos nos processamentos dos dados GPS, realizados com o programa Topcon Tools Vr. 6.04. Nos processamentos, foram fixadas as estações da RGLS como referências, proporcionando sempre linhas de base curtas (menores do que 3,5 km). Foram usadas efemérides precisas e observações da fase da onda portadora (L1), sendo que, a única solução admitida foi a fixa (fixação das ambigüidades como inteiros), por garantir precisão e confiabilidade ao processamento, como em Tanajura (2008). Com a solução fixa e um nível de confiança de 68 %, os erros padrões obtidos nos processamentos foram sempre menores do que 10 cm. As coordenadas foram determinadas diretamente em relação ao sistema SIRGAS (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas) do SGB. Mais detalhes sobre processamento de dados GPS podem ser encontrados em Monico (2007) e Seeber (1993).

#### 3.2.2. Determinação das altitudes ortométricas

As altitudes ortométricas, referenciadas à superfície de nível médio dos mares, foram calculadas a partir das altitudes geométricas, obtidas por GPS e referidas à superfície do elipsóide de referência adotado no posicionamento. Isso foi feito através da altimetria por GPS no modo relativo, na qual, a altitude ortométrica de um ponto de interesse (*i*) é determinada em relação a, pelo menos, uma estação de referência (*A*), de coordenadas geodésicas ( $\alpha_A, \lambda_A, h_A$ ) e altitudes ortométricas ( $H_A$ ) conhecidas. Isso é feito através das diferenças de altitudes geométricas ( $\Delta h_i = h_A - h_i$ ), determinadas pelo GPS, e das diferenças de alturas geoidais ( $\Delta N_i = N_A - N_i$ ), determinadas a partir de um modelo geoidal (FEATHERSTONE *et al.*, 1998; OLLIKAINEN, 1998):

$$H_i = H_A + \Delta H_i = H_A + (\Delta h_i - \Delta N_i) \quad (1)$$

Como referências à altimetria por GPS, foram utilizadas as estações da RGLS localizadas na área de estudo, as quais possuem coordenadas geodésicas e altitudes ortométricas conhecidas, e o modelo geoidal do IBGE (MAPGEO2004, IBGE, 2011). No cálculo das altitudes, foi utilizado o aplicativo desenvolvido em Santos (2011), que calcula a altitude de um ponto pela média aritmética das altitudes calculadas pelas estações mais próximas da RGLS.

### 3.3. Geração dos Modelos Digitais de Elevação (MDE)

Na geração dos MDE, foi utilizada a interpolação por triangulação com uso da técnica TIN (*Triangulated Irregular Network*), que consiste numa estrutura em que pontos cotados com distribuição irregular (ou regular) são conectados por uma rede de arestas que formam triângulos não-sobrepostos, e entre eles os valores são interpolados linearmente. Com este procedimento, as curvas de nível (isolinhas) são traçadas a partir da disposição original dos dados. Não ocorre extrapolação e as estimativas limitam-se à área resultante da soma das áreas dos triângulos (ZANARDI, 2006; MATOS, 2005). Os pontos foram conectados de acordo com a triangulação de Delaunay, a qual usa o critério da maximização dos ângulos mínimos de cada triângulo. Assim, a malha final deve conter triângulos mais próximos possível de equiláteros, evitando-se a criação de triângulos com ângulos internos muito agudos. Segundo Felgueiras (2001), uma forma equivalente de implementação da triangulação de Delaunay consiste em utilizar o critério do circuncírculo. De acordo com este critério, uma triangulação é de Delaunay se o círculo que passa pelos três vértices de cada triângulo da malha triangular não contiver, no seu interior, nenhum ponto do conjunto das amostras além dos vértices do triângulo em questão. Para aplicar o método TIN com a triangulação de Delaunay, foi utilizado o *software* ArcGIS, versão 9.2, da ESRI. Mais detalhes sobre os processos de interpolação podem ser encontrados em Zanardi (2006) e Matos (2005).

### 3.4. Controle de qualidade dos Modelos Digitais de Elevação (MDE)

Devido à impossibilidade em quantificar a combinação das diferentes fontes de erros

envolvidas na modelagem (erro do posicionamento GPS, erro de verticalidade do bastão, amostragem inadequada, aproximações nos algoritmos de interpolação, identificação das marcas definidoras da LC), o controle de qualidade dos MDE foi realizado a partir de um conjunto de pontos de controle selecionados aleatoriamente na área de estudo e que não foram usados na geração dos modelos. Suas coordenadas e altitudes foram determinadas pelo mesmo método de posicionamento usado nos pontos dos modelos. Porém, para garantir maior confiabilidade foram utilizadas várias seções. A partir dos resíduos das altitudes do modelo em relação às de referência, foram aplicadas análises estatísticas de exatidão, precisão e tendência, adotando como padrão as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional (BRASIL, 1984). O controle de qualidade permite atribuir um erro global ao modelo, a partir da média dos resíduos gerados nas amostras dos pontos de controle. Esse erro representa a combinação das diversas fontes de erros envolvidas na modelagem digital de elevação. Isso possibilita, por exemplo, avaliar a confiabilidade do modelo, indicar suas possíveis aplicações e definir até que nível de detalhe eles podem representar as feições morfológica.

#### 3.4.1. Resíduos nos pontos de controle

Os resíduos entre as altitudes de referência ( $x_i^r$ ) e as obtidas no modelo analisado ( $x_i^m$ ) são calculados pela expressão

$$\Delta x_i = x_i^r - x_i^m \quad (2)$$

em amostras com  $i=1,2,3...n$  pontos de controle selecionadas aleatoriamente na área de estudo. Assim, para os  $n$  pontos de controle, são calculados a média e o desvio padrão dos resíduos, respectivamente, por:

$$\Delta \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i \quad (3)$$

e

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta x_i - \Delta \bar{x})^2 \quad (4)$$



### 3.4.2. Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC)

A classificação de documentos cartográficos no Brasil segue as normas estabelecidas pelo Decreto Lei nº 89.817 de 20 de junho de 1984, que define o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) (BRASIL, 1984), um indicador estatístico por dispersão, relativo a 90% de probabilidade, que define a exatidão de documentos cartográficos. De acordo com o decreto, quanto à exatidão, as cartas devem seguir o PEC de acordo com o seguinte critério: 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 PEC altimétrico é estabelecido em função da classificação das cartas, nas classes A, B ou C. Assim, o PEC altimétrico (acurácia) das classes A, B e C correspondem, respectivamente, a 1/2, 3/5 e 3/4 da equidistância entre as curvas de nível. Quanto à precisão, o erro padrão (ou desvio padrão) isolado das cartas nas classes A, B e C correspondem, respectivamente, a 1/3, 2/5 e 1/2 da equidistância entre as curvas de nível, ou seja, 2/3 do PEC.

### 3.4.3. Tamanho da amostra

O tamanho da amostra, importante para a adequada análise estatística de exatidão, de precisão e de tendência, depende da variação na variável aleatória e do grau de acurácia desejado. Pode ser calculado a partir da definição do intervalo de confiança, do erro amostral, e das estatísticas (média e desvio padrão) dos erros obtidos em uma amostra inicial qualquer (por exemplo, 5, 10 ou 20). O cálculo do tamanho da amostra pode ser feito através da expressão (ZANARDI, 2006):

$$n = \frac{Z^2 \gamma^2 N}{(N - 1)\varepsilon_r^2 + Z^2 \gamma^2} \quad (5)$$

onde,  $Z$  é o intervalo de confiança,  $\gamma = s/\bar{x}$ ,  $s$  é o desvio padrão amostral,  $\bar{x}$  é a média amostral,  $N$  é o tamanho da população,  $\varepsilon$  é o erro amostral, e  $\varepsilon_r$  é o erro amostral relativo ( $\varepsilon_r = \varepsilon/\bar{x}$ ).

O valor calculado de  $n$  deve ser considerado estatisticamente suficiente para as análises se seu valor for menor do que o tamanho da amostra utilizada. Os valores do intervalo de confiança e do erro amostral são atribuídos em função da precisão

da estimativa, da finalidade da pesquisa, do custo econômico e do tempo disponível. O valor do erro amostral corresponde ao erro máximo a ser aceito quando se utiliza uma média amostral ao invés da média populacional (ZANARDI, 2006; ITAME, 2001).

### 3.4.4. Análise da exatidão

A análise de exatidão consiste em verificar, a partir de amostras de resíduos (expressão<sup>2</sup>), se o valor da média populacional estimada é estatisticamente menor do que o valor limite admissível em acurácia, de acordo com o PEC. Neste caso, utiliza-se a estimativa intervalar dada pela distribuição  $t$  de *Student*, sendo particularmente válida para amostras pequenas (até 30 pontos) (ZANARDI, 2006; ITAME, 2001, GALO & CAMARGO, 1994).

A análise consiste em construir inicialmente um intervalo de confiança com  $100(1-\alpha)\%$  de certeza para a média populacional estimada  $\mu$  a partir da média amostral  $\bar{x}$  e da variância amostral  $s^2$ , dado por (MONTGOMERY & RUNGER, 2003):

$$\bar{x} - (t_{\alpha/2}) \left( \frac{s}{\sqrt{n}} \right) \leq \mu \leq \bar{x} + (t_{\alpha/2}) \left( \frac{s}{\sqrt{n}} \right) \quad (6)$$

onde,  $\mu$  é a média populacional,  $\bar{x}$  é a média amostral,  $\alpha$  é o nível e significância,  $s$  é o desvio padrão amostral,  $n$  é o tamanho da amostra, e  $t_{\alpha/2}$  é o ponto  $100\alpha/2\%$  superior da distribuição  $t$  de *Student*.

Posteriormente, aplica-se o teste de hipótese com nível de confiança de  $100(1-\alpha)\%$  para a validação da exatidão, confrontando:

$$\begin{aligned} H_0 : \mu &= X, \text{ contra} \\ H_0 : \mu &< X^2 \end{aligned} \quad (7)$$

onde,  $X$  é o erro máximo admissível em acurácia. Neste trabalho,  $X$  corresponde ao 1/2 da equidistância entre as curvas de nível do modelo, de acordo com o PEC (ver sessão 3.4.2).

O cálculo da estatística  $t$  é dado por

$$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{\frac{s}{\sqrt{n}}} \quad (8)$$

onde,  $\mu_0$  é a média populacional esperada.

Como a hipótese alternativa  $H_1$  é unilateral ( $\mu < X$ ), rejeita-se  $H_0$  se

$$t < -t_\alpha \quad (9)$$

onde,  $-t_\alpha$  é o ponto  $100\alpha\%$  inferior da distribuição  $t$  de Student, com  $n-1$  graus de liberdade. A rejeição da hipótese nula indica que o modelo testado possui exatidão melhor do que o valor adotado para  $X$ .

Ainda, como a hipótese alternativa  $H_1$  é unilateral ( $\mu < X$ ), o intervalo de confiança da média populacional, dado pela expressão (6), se reduz ao intervalo de confiança unilateral superior da média populacional, estabelecendo o limite inferior igual a  $-\infty$  e trocando  $t_{\alpha/2}$  por  $t_\alpha$ , ou seja:

$$\mu \leq \bar{x} + (t_\alpha) \left( \frac{s}{\sqrt{n}} \right) \quad (10)$$

onde,  $t_\alpha$  é o ponto  $100\alpha\%$  superior da distribuição  $t$  de Student, com  $n-1$  graus de liberdade.

### 3.4.5. Análise da Precisão

A análise de precisão, que é a coerência interna dos elementos do MDE, consiste em verificar, a partir de amostras de resíduos (expressão 2), se o valor do desvio padrão populacional estimado é estatisticamente menor do que o valor limite admissível em precisão, de acordo com o PEC. Neste caso, utiliza-se a distribuição Qui-quadrado ( $\chi^2$ ) (ZANARDI, 2006; ITAME, 2001, GALO & CAMARGO, 1994).

A análise consiste em construir inicialmente um intervalo de confiança com  $100(1-\alpha)\%$  de certeza para o desvio padrão populacional  $\sigma$  a partir do desvio padrão amostral, dado por (MONTGOMERY & RUNGER, 2003):

$$\sqrt{\frac{(n-1)s^2}{\chi_{\alpha/2}^2}} \leq \sigma \leq \sqrt{\frac{(n-1)s^2}{\chi_{1-\alpha/2}^2}} \quad (11)$$

onde,  $\chi_{\alpha/2}^2$  e  $\chi_{1-\alpha/2}^2$  são, respectivamente, os pontos  $100\alpha/2\%$  superior e inferior da distribuição Qui-quadrado, com  $n-1$  graus de liberdade.

Posteriormente aplica-se o teste de hipótese com nível de confiança de  $100(1-\alpha)\%$  para a validação de precisão, confrontando:

$$\begin{aligned} H_0 : \sigma^2 &= X^2, \text{ contra} \\ H_0 : \sigma^2 &< X^2 \end{aligned} \quad (12)$$

onde,  $X$  é o erro máximo admissível (desvio padrão) em precisão. Neste trabalho,  $X$  corresponde a ao 1/3 da equidistância entre as curvas de nível do modelo, de acordo com o PEC (ver sessão 3.4.2).

O cálculo da estatística  $\chi^2$  é dado por

$$\chi^2 \leq \sqrt{\frac{(n-1)s^2}{\sigma_o^2}} \quad (13)$$

onde,  $\sigma_o^2$  é a variância populacional esperada.

Como a hipótese alternativa  $H_1$  é unilateral ( $\sigma^2 < X^2$ ), rejeita-se  $H_0$

$$\chi^2 < \chi_{1-\alpha}^2 \quad (14)$$

onde,  $\chi_{1-\alpha}^2$  é o ponto  $100(1-\alpha)\%$  inferior da distribuição Qui-quadrado, com  $n-1$  graus de liberdade. A rejeição da hipótese nula indica que o modelo testado possui precisão melhor do que o valor adotado para  $X$ .

Ainda, como a hipótese alternativa  $H_1$  é unilateral ( $\sigma^2 < X^2$ ), o intervalo de confiança do desvio padrão populacional, dado pela expressão (11), se reduz ao intervalo de confiança unilateral superior do desvio padrão populacional, estabelecendo o limite inferior igual a zero e trocando  $\chi_{1-\alpha/2}^2$  por  $\chi_{1-\alpha}^2$  ou seja,

$$\sigma \leq \sqrt{\frac{(n-1)s^2}{\chi_{1-\alpha}^2}} \quad (15)$$

onde,  $\chi_{1-\alpha}^2$  é o ponto  $100\alpha\%$  inferior da distribuição Qui-quadrado, com  $n-1$  graus de liberdade.

### 3.4.6. Análise de Tendência

A análise de tendência consiste em verificar se a média dos resíduos (expressão 2) é

estatisticamente nula, ou seja, se a amostra está livre de tendência. Neste caso, utiliza-se a estimativa intervalar dada pela distribuição *t* de Student (para amostras com até 30 pontos) (ITAME, 2001, GALO & CAMARGO, 1994).

A análise consiste na aplicação de um teste de hipótese com nível de confiança de  $100(1-\alpha)\%$  para a verificação da tendência, confrontando (MONTGOMERY & RUNGER, 2003):

$$\begin{aligned} H_0 : \bar{x} &= 0, \text{ contra} \\ H_1 : \bar{x} &\neq 0 \end{aligned} \quad (16)$$

onde,  $\bar{x}$  é a média amostral. O cálculo da estatística *t* é dado por

$$t = \frac{\bar{x}}{s} \sqrt{n} \quad (17)$$

Como a hipótese alternativa  $H_1$  é bilateral ( $\bar{x} \neq 0$ ), aceita-se  $H_0$  se

$$-t_{\alpha/2} \leq t \leq +t_{\alpha/2} \quad (18)$$

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 significa a ocorrência de problemas na modelagem, cujas causas podem ser as mais variadas. Conhecido o valor da tendência, seu efeito

pode ser minimizado pela subtração do valor a cada coordenada do modelo (GALO & CAMARGO, 1994).

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO DO ESTUDO DE CASO

Este item apresenta os resultados obtidos na aplicação da metodologia proposta em estudo de caso realizado entre os dias 10 e 12 de fevereiro de 2011. A sequência das seções mostra as LC, os MDE, as análises realizadas e o controle de qualidade.

##### 4.1. Linhas de Costa

A Figura 2 ilustra as LC dos quatro trechos monitorados, Praia da Soledade, Ilha da Ponta do Tubarão, Ilha do Fernandez e Praia do Minhoto, para o mês de fevereiro de 2011 (ver Figura 1), no sistema de projeção plana UTM (Fuso 24). Como indica a Figura 2, as LC das praias e ilhas possuem forma predominante de arcos côncavos, orientadas aproximadamente na direção Leste-Oeste, e com três trechos de inflexão. Ao Norte, as praias e ilhas são limitadas pelo Oceano Atlântico, estando expostas aos ventos, ondas e correntes de maré de mar aberto da região. Ao Sul, as ilhas barreiras estão voltadas para o continente, protegido da ação do mar aberto, formando os estuários de Barreiras e Diogo Lopes (Figura 1); nas praias oceânicas, o limite Sul é o continente, e a largura da faixa de praia monitorada variou em função das feições morfológicas encontradas na área (Item3).

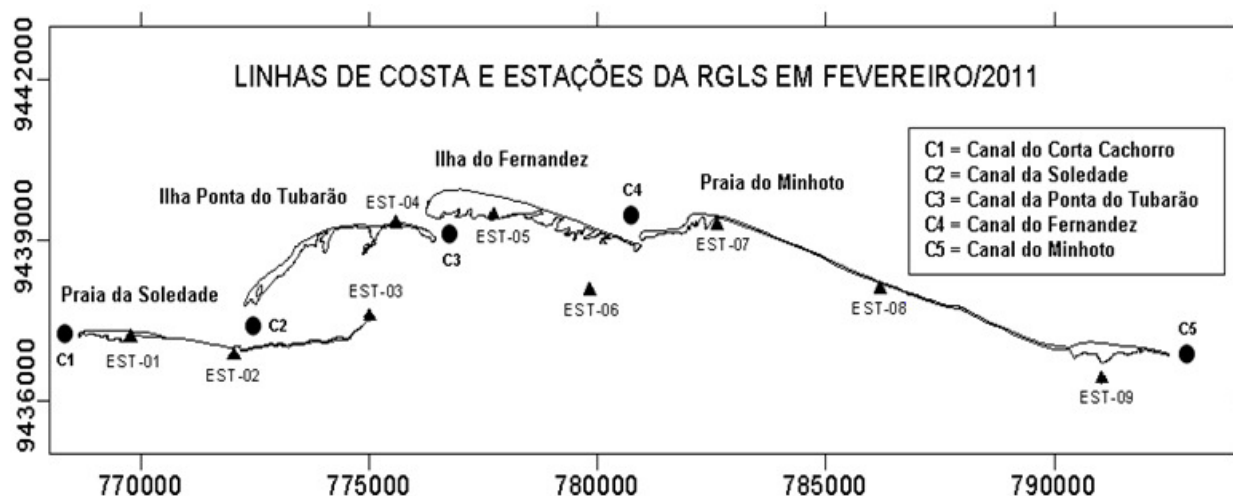


Fig. 2 - Linhas de costa dos trechos monitorados da área de estudo para fevereiro de 2011. Linhas contínuas: linhas de costa. Círculos: canais de maré. Triângulos: estações da RGLS.

## 4.2. Modelos Digitais de Elevação (MDE)

As Figuras 3, 4 e 5 apresentam, respectivamente, os MDE da Praia da Soledade, da Ilha da Ponta do Tubarão e da Praia do Minhoto, gerados pelo método TIN com a triangulação de Delaunay, de acordo com a metodologia descrita no Item 3 e no sistema de projeção plana UTM (Fuso 24). As curvas de nível foram geradas com equidistância vertical de 0,5 m compatível com a acurácia dos modelos. Para melhorar a visualização dos modelos nas escalas adotadas, foi aplicada uma tabela de cores com variações de 0,5m, do azul (altitude ortométrica mais baixa) ao vermelho (altitude ortométrica mais alta). Para efeito de modelagem e análise, o trecho da Praia da Soledade foi subdividido em dois setores, A (oeste) e B (leste), e o trecho da Praia do Minhoto em três setores, A (oeste), B (central) e C (leste).

### 4.2.1. Padrão de distribuição espacial do relevo

Em todos os trechos modelados foram notados padrões na distribuição do relevo, que

variaram principalmente em função do grau de exposição das LC às ondas de mar aberto. Na Praia de Soledade (Figura 3), o setor A apresentou altitudes mais altas na praia exposta na margem Norte (exposta às ondas) e mais baixas no estuário na margem Sul (protegida das ondas e sob efeito das correntes de maré). Ainda, as partes mais altas (dunas) estão concentradas na porção mais a Leste e as partes mais baixas (canal de maré) estão na porção mais a Oeste, indicando o processo de construção da barra arenosa no sentido da corrente de deriva litorânea de Leste para Oeste. No setor B ocorreu o contrário, ou seja, as altitudes aumentaram da praia exposta na margem Norte (protegida das ondas pela presença da Ilha Ponta do Tubarão) em direção ao continente, no qual há pequenos trechos com dunas eólicas. Na Ilha da Ponta do Tubarão (Figura 4), a praia exposta na margem Norte (exposta às ondas) apresentou as maiores altitudes, enquanto o estuário na margem Sul (protegido das ondas) as menores altitudes. Na Ilha do Fernandez, devido à presença de extensos

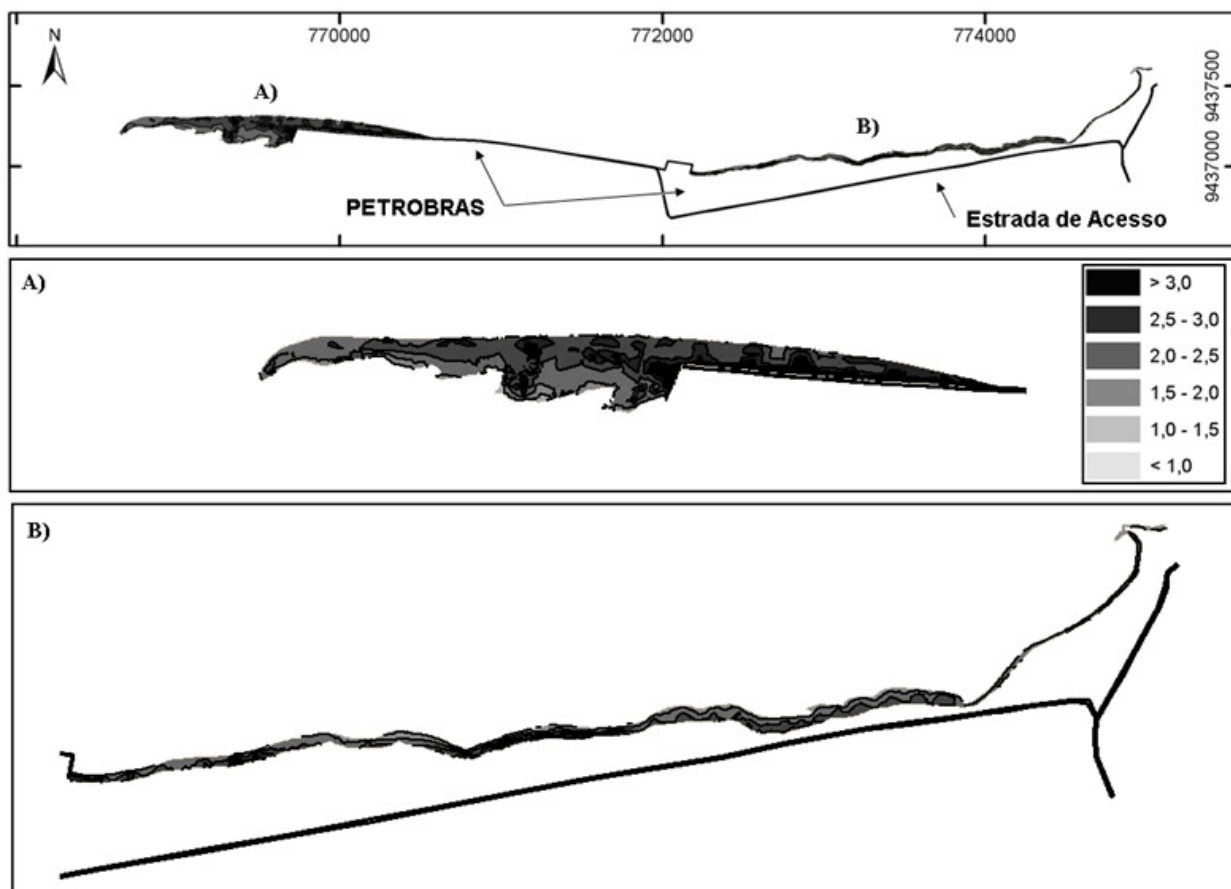


Fig. 3 – Modelo Digital de Elevação da Praia da Soledade para Fevereiro/2011. Destaque para os trechos A e B. Equidistância vertical das curvas de nível de 0,5m. Polígonos na LC são instalações da PETROBRAS. Unidade: metro.

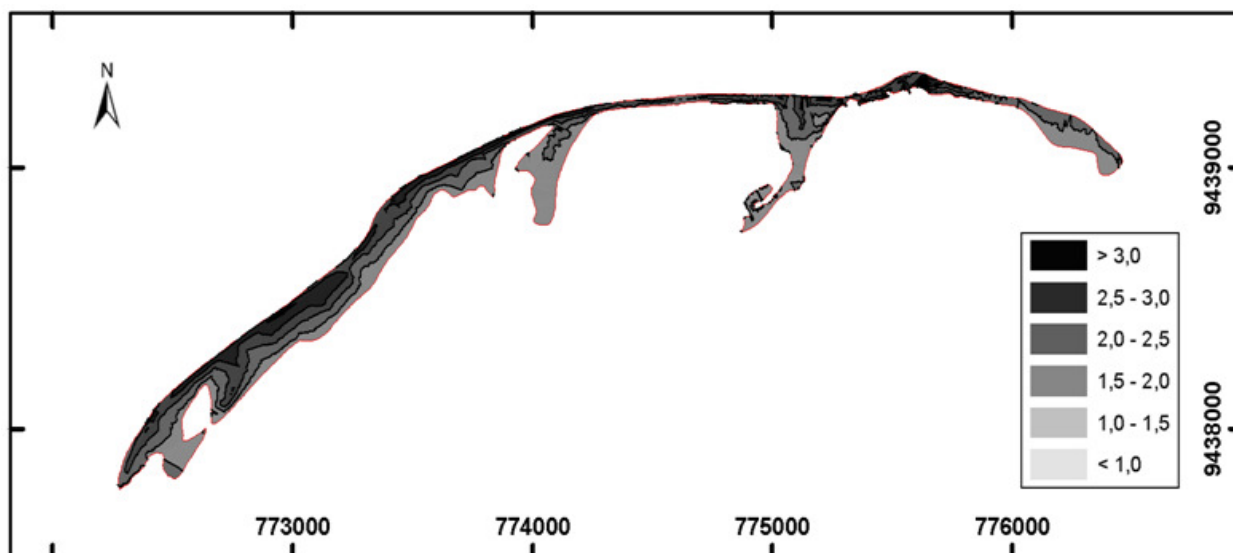


Fig. 4 – Modelo Digital de Elevação da Ilha da Ponta do Tubarão para Fevereiro/2011. Equidistância vertical das curvas de nível de 0,5m. Unidade: metro.

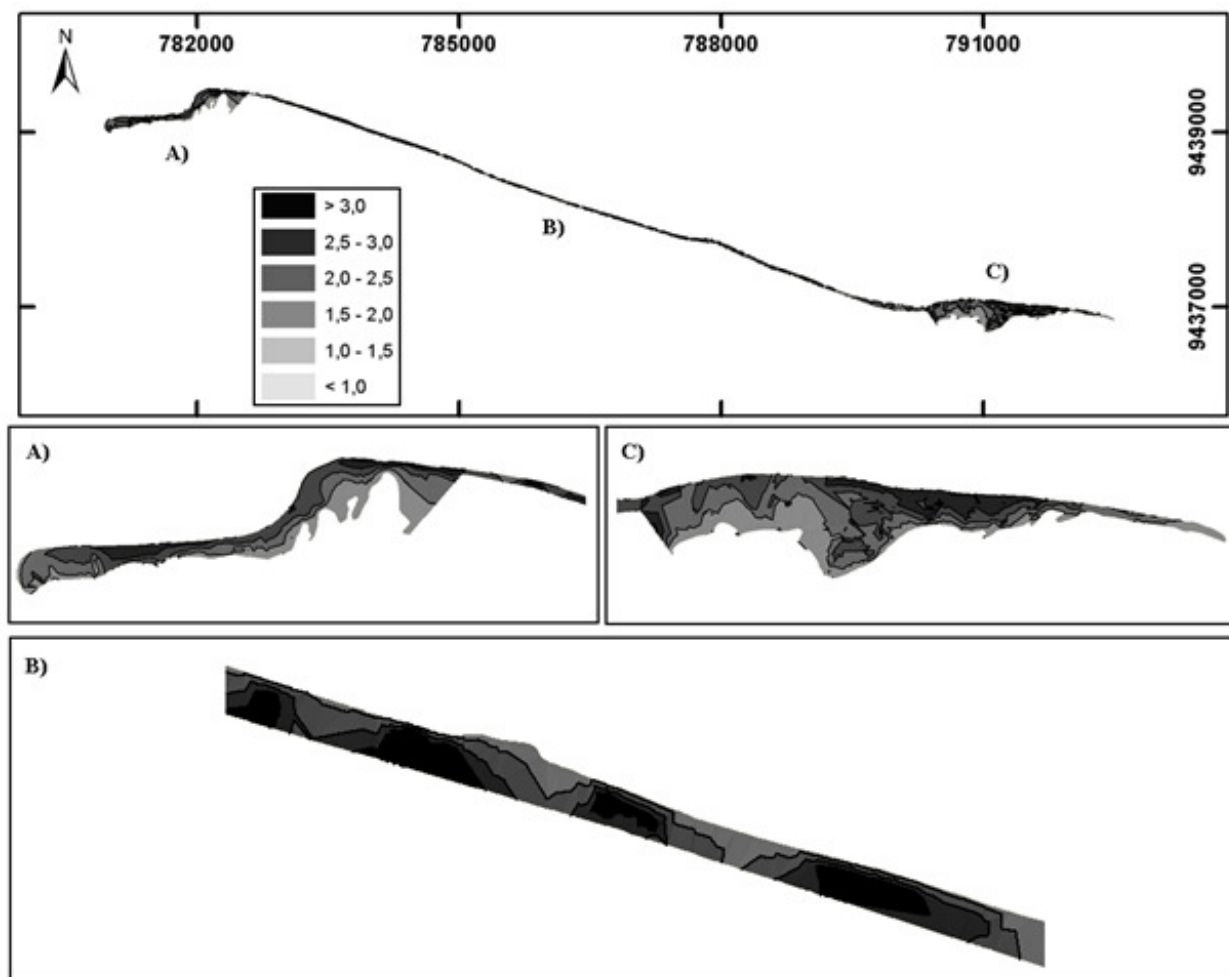


Fig. 5 – Modelo Digital de Elevação da Praia do Minhoto para Fevereiro/2011. Destaque para os trechos A, B e C. Equidistância vertical das curvas de nível de 0,5m. Unidade: metro.

campos de dunas fixas e móveis, vegetação de manguezais e de outros tipos, os levantamentos somente foram realizados na LC. No entanto,

apresentou padrão de distribuição do relevo semelhante à Ilha Ponta do Tubarão. Na Praia do Minhoto (Figura 5), os setores A e C apresentaram

altitudes mais elevadas na praia exposta da margem Norte (exposta às ondas) e menos elevadas no estuário na margem Sul (protegida das ondas). No setor B as altitudes aumentam da praia na margem Norte em direção ao continente, devido à grande disponibilidade de sedimentos da pós-praia, além dos extensos trechos com campos de dunas eólicas.

Esse padrão de distribuição do relevo pode ser explicado pela própria definição de LC adotada neste trabalho, ou seja, o limite de espraiamento das ondas na face de praia. Nas praias expostas às ondas (margem Norte do setor A na praia da Soledade, margem Norte da Ilha Ponta do Tubarão, da Ilha do Fernandez e da Praia do Minhoto), as ondas de alta energia do período do levantamento avançaram em direção ao continente, erodiram a praia e atingiram feições morfológicas que antes eram da pós-praia, como o berma e dunas frontais. Com o contínuo processo de erosão, a LC conseguiu remover sedimentos e atingir feições cada vez mais elevadas, formando até escarpas de erosão. Nas áreas estuarinas protegidas da ação das ondas (margem Norte do setor B da Praia da Soledade, margem Sul da Ilha Ponta do Tubarão, Ilha do

Fernandez e dos setores A e C da Praia do Minhoto) a ausência das ondas de mar aberto provoca pouca variação horizontal nas LC e cria um ambiente de calmaria, que gera LC com altitudes mais baixas. Essas áreas favorecem o acúmulo de sedimentos mais finos, inconsolidados e que favorecem a fixação de manguezais, que tornam o ambiente relativamente estável no tempo. No entanto, as áreas expostas às ondas e com hidrodinâmica mais ativa (ondas, ventos e marés) favorecem a geração de dunas.

#### 4.2.2. Frequências das altitudes dos MDE

As Figuras 3, 4 e 5 mostraram as variações espaciais das altitudes em intervalos de 0,5 m e a Seção 4.2.1 descreveu o padrão de distribuição espacial do relevo. A Figura 6 mostra os histogramas das altitudes dos 4 trechos levantados, que mostram as frequências de ocorrências das altitudes em intervalos de 0,5 m. A partir dos MDE e dos histogramas das altitudes, nota-se que o relevo da área é relativamente plano, com altitude mínima de 0,513 m na Ilha do Fernandez e máxima de 6,004 m na Praia do Minhoto, ou seja, diferença de nível máxima de 5,491 m. No entanto, os histogramas

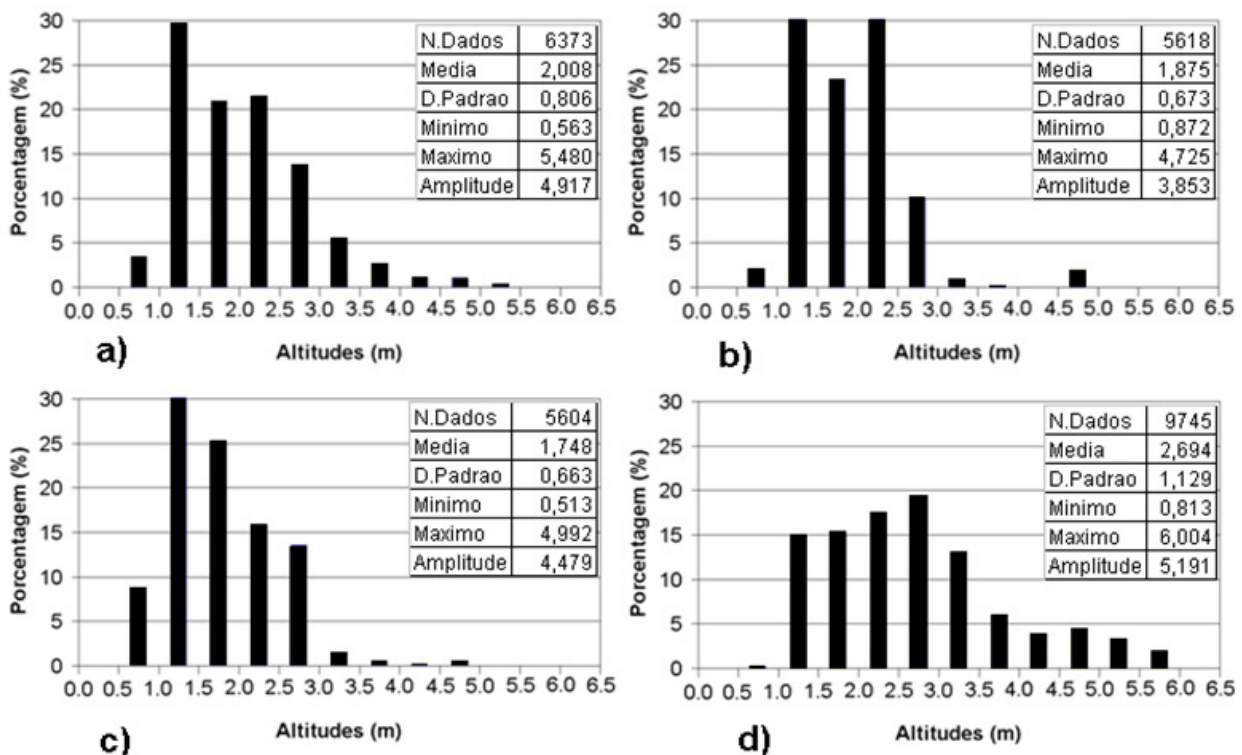


Fig. 6 – Histograma das altitudes ortométricas das praias e ilhas modeladas em fevereiro/2011: a) Praia da Soledade, b) Ilha da Ponta do Tubarão, e c) Ilha do Fernandez, e d) Praia do Minhoto. Unidade: metro.

mostraram que, em cada trecho modelado, a maioria das altitudes se concentrou entre 1 e 3 m, ou seja, amplitude de 2 m. Na Praia da Soledade, 86 % das altitudes apresentaram valores entre 1 e 3 m, 4 % inferiores a 1 m e 10 % superiores a 3 m. Na Ilha Ponta do Tubarão, 95 % das altitudes tiveram valores entre 1 e 3 m, 2 % inferiores a 1 m e 3 % superiores a 3 m. Na Ilha do Fernandez, 89 % das altitudes foram entre 1 e 3 m, 9 % inferiores a 1 m e 2 % superiores a 3 m. No entanto, a Praia do Minhoto apresentou distribuição das altitudes diferente das demais: apenas 67 % das altitudes apresentaram valores entre 1 e 3 m, 0,2 % foram inferiores a 1 m e 33 % superiores a 3 m. A maior porcentagem de altitudes elevadas na Praia do Minhoto ocorreu devido à presença de extensos campos de dunas localizado na porção central da praia (Figura 5). Assim, a média das altitudes da Praia do Minhoto (2,694 m) foi 0,817 m superior à média das altitudes dos outros trechos (1,877 m).

#### 4.2.3. Feições morfológicas modeladas nos MDE

Nos MDE gerados, foi possível a identificação das principais feições morfológicas típicas de zonas de praia, tais como perfis de praia emersa, bermas e cristas de bermas, dunas frontais e campos de dunas, planos horizontais e inclinados, depressões e elevações, além de feições morfológicas sob erosão, como escarpas em bermas e dunas frontais. A Figura 7 ilustra exemplos de feições morfológicas encontradas nos modelos. A Figura 7a representa um trecho de um campo de dunas, formado pelo acúmulo de sedimentos transportado pelos ventos, onde as elevações estão representadas em vermelho e os corredores com outras cores representativas de pontos mais baixos; os corredores possuem direção NE, sentido dos ventos atuantes na área no período do levantamento. A Figura 7b mostra um trecho com escarpa de erosão em duna frontal, formada pela remoção de sedimentos provocada pelo impacto das ondas sobre a duna frontal, com suas elevações e corredores bem definidos e também de direção NE. Nos exemplos mostrados, pode-se inferir a respeito da relação entre os relevos dos trechos, independente da posição espacial, pois estão georreferenciados e relacionados a um mesmo referencial altimétrico; assim, por exemplo, as dunas frontais possuem altitudes mais baixas do que os campos de dunas.

#### 4.3. Quantidades realizadas e controle de qualidade dos modelos

Em termos quantitativos, as LC e as superfícies de praia foram levantadas com amostras de pontos com coordenadas geodésicas de alta densidade e boa distribuição espacial. A área total de 2.763.721,79 m<sup>2</sup> e perímetro de 64.956,76 m foram levantados com 27.359 pontos amostrais e em 10h30min, resultando em densidades de 43,41 pontos/minuto ou 98,96 pontos/hectare. Esta alta produtividade na aquisição de dados só foi possível principalmente devido ao método de posicionamento adotado (relativo cinemático com intervalo de gravação de dados de 1s) e ao veículo quadriciclo utilizado, que permitiu o rastreamento contínuo dos dados GPS ao longo do trajeto do veículo. Além da alta produtividade, destaca-se a boa precisão na aquisição de dados com o posicionamento GPS pelo método relativo cinemático. Nas quatro áreas levantadas, os erros padrões estimados nos processamentos de dados GPS foram de  $0,013 \pm 0,004$  m em N,  $0,021 \pm 0,003$  m em E, e  $0,020 \pm 0,003$  m em h. Os bons resultados obtidos mostram que os parâmetros utilizados, tais como duração da sessão, comprimento da linha de base, tipo de receptores e método de aquisição e processamento foram adequados para se obter boa precisão. O uso das estações da RGLS no interior de cada área possibilitou linhas de base curtas aos posicionamentos, de no máximo 3,5 km. Essas linhas de base permitem a eliminação de várias fontes de erros envolvidos no posicionamento relativo, o que facilita a fixação da ambiguidade de forma rápida e precisa (MONICO, 2007; SEEBER, 1993).

No controle de qualidade dos MDE (Seção 3.4), que avalia a combinação das diferentes fontes de erros sistemáticos na modelagem digital de elevação, os resíduos obtidos entre as altitudes de referência e dos modelos, nos 30 pontos de controle, apresentaram as seguintes estatísticas: média de -0,024 m, desvio padrão de 0,158 m, mínimo de -0,307 m, máximo de 0,217 m e amplitude de 0,524 m. Para a população de 27.359 pontos amostrais, intervalo de confiança de 90 % ( $Z=1,6449$ ) e erro amostral de 0,05 m, o valor de  $n$  calculado foi de 26,9, ou seja, os 30 pontos de controle coletados em campo são estatisticamente suficientes para as análises de precisão, acurácia e tendência. Na análise de exatidão o valor do teste  $t$  de *Student* calculado ( $t=-9,528$ ) pela expressão

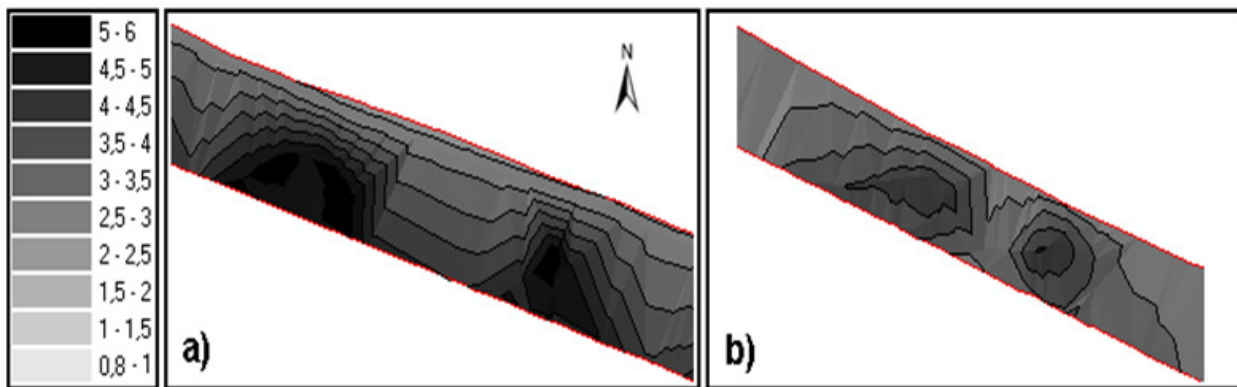


Fig. 7 – Exemplos de feições morfológicas modeladas na área de estudo: a) Campos de dunas e b) Escarpas em dunas frontais. Equidistância das curvas de nível de 0,5m. Unidade: metro.

(8) foi menor do que o valor do teste  $t$  de Student tabelado ( $-t_{\alpha} = -1,311$ ). Portanto, foi rejeitada a hipótese nula e aceita a hipótese experimental, o que significa que a média populacional calculada pela expressão (10) (inferior a 1,3 cm) foi estatisticamente menor ou igual ao erro máximo admissível em acurácia (0,25 m para a classe A). Na análise de precisão, o valor do *Qui-quadrado* calculado ( $\chi^2 = 5,097$ ) pela expressão (13) foi menor do que o valor de *Qui-quadrado* tabelado ( $\chi^2_{1-\alpha} = 39,087$ ). Portanto, foi rejeitada a hipótese nula e aceita a hipótese experimental, o que significa que o desvio padrão populacional calculado pela expressão (15) (inferior a 0,136 m) foi estatisticamente menor ou igual ao erro máximo admissível em precisão (0,167 m para a classe A). Na análise de tendência, o valor do teste  $t$  de Student calculado ( $t = -0,847$ ) pela expressão (17) esteve entre o limite inferior e o superior do teste  $t$  de Student tabelado.

Portanto, foi aceita a hipótese nula, o que significa que o modelo gerado está livre de tendência. Assim de acordo com a classificação de documentos cartográficos, para um nível de confiança de 90 %, os MDE gerados foram classificados como classe A em termos de precisão e acurácia e estão livres de tendência.

## 5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou a metodologia geodésica desenvolvida para o levantamento, geração e avaliação de LC e MDE de litorais arenosos para estudos de dinâmica costeira (erosão/acresção sedimentar), assim como um estudo de caso realizado no sistema de ilhas barreiras com praias arenosas e canais de maré intermitentes do Litoral Setentrional do RN.

A metodologia utilizada permitiu o levantamento de LC e a modelagem digital de elevação de extensos trechos litorâneos em um tempo relativamente curto e com boa precisão. A análise dos dados quantitativos permitiu mensurar o grau de produtividade da metodologia utilizada: a área de 2.763.721,79 m<sup>2</sup> e perímetro de 64.956,76 m foram levantados em aproximadamente 10 h 30 min., distribuídas em 3 dias e com um total de 27.359 pontos amostrais. Além da alta produtividade, destacou-se a boa precisão com o posicionamento GPS pelo método relativo cinemático. Nas quatro áreas levantadas, os erros padrões estimados nos processamentos de dados GPS foram de  $0,013 \pm 0,004$  m em N,  $0,021 \pm 0,003$  m em E, e  $0,020 \pm 0,003$  m em h. O controle de qualidade dos MDE, a partir de 30 pontos de controle, resultou em um conjunto de resíduos entre as altitudes de referência e dos modelos, que apresentaram as seguintes estatísticas: média de -0,024 m, desvio padrão de 0,158 m, mínimo de -0,307 m, máximo de 0,217 m e amplitude de 0,524 m. De acordo com a classificação de documentos cartográficos, para um nível de confiança de 90 %, os MDE foram classificados como classe A em termos de acurácia e precisão, além de estarem livres de tendência.

A partir dos MDE, foi possível extrair dados quantitativos, tais como área e perímetro emersos, volume de sedimentos acima do nível médio do mar e frequências das altitudes. Ainda, observou-se que o relevo da área é relativamente plano, com altitude mínima de 0,513 m na Ilha do Fernandez e máxima de 6,004 m na Praia do Minhoto, ou seja, diferença de nível máxima de 5,491 m. No entanto, na maioria dos trechos, as frequências das altitudes para o período se localizaram entre 1 e 3 m. Na análise



qualitativa, foi possível identificar as formas morfológicas e os padrões de distribuição espacial do relevo em cada trecho modelado. Quanto à forma, foram modeladas as principais feições morfológicas típicas de zonas de praia, tais como perfis de praia emersa, bermas e cristas de bermas, dunas frontais e campos de dunas, planos horizontais e inclinados, depressões e elevações, além de feições morfológicas sob erosão, como escarpas em bermas e dunas frontais. Quanto à distribuição espacial, foram observados comportamentos diferentes nas praias e ilhas modeladas, principalmente com relação à presença de campos de dunas e à exposição às ondas de mar aberto. Portanto, em uma área peculiar como a modelada, dinâmica, de grandes dimensões e com desníveis relativamente baixos, realçar comportamentos do relevo não é uma tarefa fácil. As análises qualitativas e quantitativas do relevo da área só foram possíveis devido à boa precisão dos modelos, que está relacionada principalmente à precisão do posicionamento GPS e à quantidade e distribuição espacial dos pontos amostrais levantados em campo.

Em termos de avanços metodológicos, as características da metodologia apresentada e os resultados obtidos mostram que ela tem amplo potencial nos estudos da morfodinâmica costeira de alta resolução espaço-temporal. O georreferenciamento dos MDE em relação ao SGB (unívoco, fixo e relativamente estável no tempo) permite que os levantamentos sejam realizados sempre na mesma referência geodésica, o que possibilita a comparação multitemporal dos modelos. A precisão alcançada nos modelos permitiu a modelagem de feições morfológicas de dimensões decimétricas, o que mostra ser possível o monitoramento de variações morfológicas no mesmo nível de detalhe em que foram modeladas. Por último, o indicador de LC representa o limite de espraiamento das ondas na face de praia em preamar, em uma maré específica, o que permite que os levantamentos temporais sejam realizados sob as mesmas condições de maré. Assim, se realizado de maneira sistemática no tempo, os modelos podem ser utilizados no estudo dos efeitos da atuação dos agentes dinâmicos costeiros (clima, ventos, ondas e correntes) sobre as variações temporais das LC e das superfícies de praias e no auxílio ao entendimento das causas e consequências da erosão costeira.

## AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa foi financiada com recursos de projetos de pesquisa da Rede Cooperativa de Pesquisa Norte-Nordeste no Monitoramento de Áreas sob Influência da Indústria Petrolífera (REDE 05 – PETROMAR, CTPETRO – FINEP/PETROBRAS/CNPq): Projetos Cooperativos HIDROSEMA, POTMAR, MOLECO e CRONALOG. As atividades foram desenvolvidas com o apoio logístico do Laboratório de Geoprocessamento do Departamento de Geologia da UFRN (GEOPRO/DG/UFRN) e do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia do Petróleo (PPGCEP). Os autores agradecem especialmente à CAPES, pela concessão de Bolsa de Doutorado ao primeiro autor, e aos revisores anônimos pelas importantes contribuições.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAPTISTA, P.; BASTOS, L.; BERNARDES, C.; CUNHA, T.; DIAS, J.A. Monitoring Sandy Shores Morphologies by DGPS — A Practical Tool to Generate Digital Elevation Models. **Journal of Coastal Research**, v. 24, n.6, p.1516-1528, 2008.
- BOAK, E.H. & TURNER, I.L. Shoreline Definition and Detection: A Review. **Journal of Coastal Research**, v. 1, n. 4, p. 688-703, 2005
- BRASIL, Decreto no 89.817 de 20 de julho de 1984. **Estabelece as instruções reguladoras e normas técnicas da Cartografia Nacional**. Diário Oficial, Brasília.
- COWART, L; WALSH, J.P; CORBETT, D.R. Analyzing Estuarine Shoreline Change: A Case Study of Cedar Island, North Carolina. **Journal of Coastal Research**, v.26, n.5, p.817-830, 2010.
- ESTEVES, L.S.; WILLIAMS, J.J.; DILLENBURG, S.R. Seasonal and Interannual Influences on the Patterns of Shoreline Changes in Rio Grande do Sul, Southern Brazil. **Journal of Coastal Research**, v. 22, n. 5, p. 1076-1093, 2006.
- FEATHERSTONE, W.E.; DENTITH, M.C. & KIRBY, J.F. Strategies for the accurate determination of orthometric heights from GPS. **Survey Review**, v. 34, p. 278-295, 1998.

- FELGUEIRAS, C.A.: **Modelagem Numérica de Terreno**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE-8081-PRE/3896, p.39, 2001
- GALO, M.; CAMARGO, P. de O. O uso do GPS no controle de qualidade de cartas. In: 1º Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário. **Anais II**, Florianópolis, p. 41-48, 1994.
- GONÇALVES, R. M.; COELHO, L. S.; KRUEGER, C.P. HECK, B. Modelagem preditiva de Linha de Costa utilizando redes neurais artificiais. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 16, n. 3, p. 420-444, 2010.
- 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, n. 2, p. 412- 421, 2005.
- IBGE (FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA). **Informações obtidas da página do IBGE na internet**: Disponível em <www.ibge.gov.br> Acesso: 01 janeiro 2011.
- ITAME, O.Y. **Controle de Qualidade Aplicado na Modelagem Digital de Terreno**. 2001. 106f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Departamento de Cartografia, Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.
- KLEMAS, V. – 2011 - Remote Sensing Techniques for Studying Coastal Ecosystems: An Overview. **Journal of Coastal Research**, v. 27, n. 2, p. 2-17, 2011.
- KOTSAKIS, C. & SIDERIS, M.G. On the adjustment of combined GPS/levelling/geoid networks. **Journal of Geodesy**, v. 73, p. 412-421, 1999.
- MATOS, A.C.O.C. **Implementação de MDT digitais de terreno para aplicações na área de geodésia e geofísica na América do Sul**. 2005. 335f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Departamento de Engenharia de Transportes, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- MONICO, J.F.G. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações**. São Paulo: Editora Unesp, p. 477, 2007.
- MOORE, L.J.; RUGGIERO, P., LIST, J.H. Comparing Mean High Water and High Water Line shorelines: Proxy Datum Offsets be Incorporate into shoreline Change Analyses. **Journal Of Coastal Research**, v. 22, p. 894-905, 2006.
- MONTGOMERY, D.C. & RUNGER, G.C. – 2003 – **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. Editora LTC, Rio de Janeiro, 463 f.
- OLLIKAINEN, M. Accuracy of GPS levelling. In: The XIII General meeting of the Nordic Geodetic Commission. Sweden. **Anais 1**: p. 25-29, 1998.
- ROCHA, C.P.; ARAÚJO, T.C.M.; MENDONÇA, F.J.B. Methodology for Location of Shorelines using 3D-GPS Positioning: A Case Study at Sauaçui Beach, Northeast Brazil. **Journal of Coastal Research**. Jul 2009, v. 25, n. 4, p. 1052-1058, 2009.
- SANTOS, M.S.T. **Contribuição da Geodésia ao Monitoramento Costeiro do Litoral Setentrional do RN, área da Indústria petrolífera**. 2011. 154f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Petróleo) – Centro de Ciências Exatas e da Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- SEEBER, G. **Satellite Geodesy: Foundations, methods and applications**. Walter de Gruyter, N. York, p.531, 1993.
- SILVA, D.R.V.; AMARO, V.E.; SOUTO, M.V.S.; NASCIMENTO, M.C.; PEREIRA, B.R.B. Geomorfologia de uma área com alta sensibilidade ambiental na Bacia Potiguar (NE do Brasil). **Revista Gestão Costeira Integrada**. v. 10, n. 4, p. 545-566, 2010.
- 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, 2004.

TANAJURA, E.L.X. **Investigações quanto aos parâmetros que influenciam no processamento de dados GPS visando a geração do MDT do esporão arenoso da Ilha do Mel.** 2008. 106f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

ZANARDI, R.P. **Geração de Modelo Digital de Terreno a Partir de Par Estereoscópico do Sensor CCD do Satélite CBERS-2 e Controle de Qualidade das Informações Altimétricas.** 2006. 94 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul.