



## Mapeamento de precisão da dinâmica costeira de curta duração em áreas de alta taxa de erosão no Nordeste do Brasil

Marcelo Soares Teles Santos<sup>1,2</sup>, Venerando Eustáquio Amaro<sup>1,2,3</sup>, Anderson Targino da Silva Ferreira<sup>2,3</sup>, André Luis Silva dos Santos<sup>1,2</sup>

Recebido em 11 de dezembro de 2012 / Aceito em 24 de janeiro de 2012

### Resumo

Este trabalho apresentou as técnicas utilizadas no mapeamento de precisão da dinâmica costeira de curta duração como ferramenta estratégica aos estudos dos intensos processos costeiros sazonais atuantes (erosão, transporte, balanço e suprimento sedimentares) em um trecho do Litoral Setentrional do Estado do Rio Grande do Norte. Para isso, pontos amostrais planialtimétricos de Linhas de Costa (LC) e superfícies de praia coletados em campo (trimestralmente) foram inseridos em uma base de dados digital georreferenciada, sobre a qual foram gerados e representados os modelos de LC e Modelos Digitais de Elevação (MDE), assim como de suas variações temporais. Os mapeamentos foram realizados nas componentes planimétrica e planialtimétrica, sendo gerados os seguintes mapas temáticos: mapas intra-anuais das LC, gráficos das variações das LC, mapas de áreas e volumes de erosão/acresção, MDE e fluxograma do balanço sedimentar. A análise dos mapas temáticos permitiu a identificação e a medição das variações das LC e das áreas e volumes de erosão/acresção, cálculo do volume e da orientação do transporte de sedimentos na LC e nas superfícies de praias, além da análise do balanço e do suprimento sedimentares. Assim, o uso de técnicas adequadas de mapeamento permitiu o melhor entendimento e análise da dinâmica costeira sazonal de curta duração.

Palavras chaves: Linha de Costa, MDE, Monitoramento Costeiro, GPS.

### Abstract

*This work presented the techniques used in precision mapping of short-lived intra-annual coastal dynamics as a strategic tool for the study of intense coastal processes operating seasonally (erosion, sediment transport, sedimentary balance and supply) at a section of the Northern Coast of Rio Grande do Norte State. Therefore, the planialtimetric sampling points of Coastlines (CL) and beach surfaces collected in field (quarterly) were inserted in a georeferenced digital database, which were generated and represented the CL models and Digital Elevation Models (DEM), as well as their temporal variations. The mappings were done in the planimetric and planialtimetric components, being generated the following thematic maps: CL intra-annual maps, CL variation diagrams, maps of areas and volumes of erosion/accretion, DEM and sedimentary balance flowchart. The analysis of thematic maps allowed the identification and measurement of variations of the CL and the areas and volumes of erosion/accretion, volume calculation and orientation of sediment transport in CL and beaches areas, in addition to the analysis of sediment balance and supply. Thus, the use of appropriate techniques for mapping enabled better understanding and analysis of short-lived seasonal coastal dynamics.*

**Keywords:** Coastlines (CL), Digital Elevation Model (DEM), Coastal monitoring, GPS.

*1 Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia do Petróleo da UFRN, Centro de Ciências Exatas e da Terra. Campus Universitário Lagoa Nova, CEP 59078-970 - Natal, RN - Brasil; Telefone: (84) 32153904. E-mail: mstsantos@yahoo.com.br; als10@yahoo.com.br. 2 Laboratório de Geoprocessamento - GEOPRO, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Campus Universitário Lagoa Nova, CEP 59078-970 - Natal, RN - Brasil. E-mail: amaro@geologia.ufrn.br 3 Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica da UFRN, Centro de Ciências Exatas e da Terra. Campus Universitário Lagoa Nova, CEP 59078-970 - Natal, RN - Brasil - Caixa-Postal: 1596; Telefone: (84) 32153831 Fax: (84) 32153807 (234). E-mail: andersontargino@yahoo.com.br*

## 1. Introdução

A área de estudo está localizada no Litoral Setentrional do Estado do Rio Grande do Norte (RN), entre os municípios de Macau e Guamaré (Fig. 1), constituída por um sistema de praias oceânicas (praias de Soledade e Minhoto), ilhas barreiras (ilhas da Ponta do Tubarão e do Fernandez) e canais de maré submetidos à intensa ação de processos costeiros que promovem as variações na Linha de Costa (LC), o transporte eólico e litorâneo, a erosão generalizada, as alterações no balanço de sedimentos, as aberturas e fechamentos de canais de marés e a formação de novas ilhas barreiras e barras arenosas (Grigio *et al.*, 2005; Chaves *et al.*, 2006; Souto, 2009; Nascimento, 2009; Franco, 2010; Santos & Amaro, 2011). Neste contexto de intensa dinâmica costeira estão inseridas importantes atividades socioeconômicas para o RN, tais como a indústria salinera, a petrolífera, a eólica e a de carcinicultura, além da importância ecológica e ambiental da área, marcadas pela criação da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Estadual Ponta do Tubarão (RDSPT, Lei Estadual nº 8.349 de 18 de Julho de 2003).

As atividades industriais instaladas na zona de praia estão submetidas a processos erosivos e acrescionais ocorridos ao longo dos ciclos anuais de construção e destruição das praias que modificam a morfologia da costa em curto intervalo de tempo, de acordo com as mudanças sazonais. Assim, o monitoramento costeiro tem sido realizado, numa escala temporal trimestral, com vistas a analisar as causas e consequências dos intensos processos costeiros (erosão, transporte, suprimento e balanço sedimentares) e servir como subsídio à mitigação dos impactos causados pela dinâmica costeira. A estratégia metodológica consistiu na determinação e comparação de LC e Modelos Digitais de Elevação (MDE) em trechos selecionados da área de estudo, em épocas cujos parâmetros dos agentes dinâmicos costeiros modeladores do relevo (ventos, ondas e correntes) fossem reconhecidos, e nas correlações entre as variações superficiais e volumétricas medidas e a atuação dos agentes durante os intervalos dos monitoramentos (Santos, 2011).

Nos monitoramentos costeiros de curta duração, que devem ser auxiliados por levantamentos geodésicos de precisão, é necessário o uso de técnicas de mapeamento que permitam o realce e a visualização das pequenas variações ocorridas na escala de tempo sazonal (interanual). O mapeamento, se realizado de maneira adequada, pode auxiliar em assuntos relacionados à evolução costeira, tais como na alimentação de modelos de cenários futuros 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, diante de situações como as mudanças climáticas globais, a elevação do nível do mar, os fenômenos climáticos globais como o *El Niño* e a *La Niña*, a expansão populacional e a ocupação das zonas litorâneas (Souto *et al.*, 2004; Boak & Turner, 2005; Moore *et al.*, 2006; Esteves *et al.*, 2006; Baptista *et al.*, 2008; Rocha *et al.*, 2009; Gonçalves *et al.*, 2010; Cowart *et al.*, 2010; Klemas, 2011).

O objetivo deste trabalho foi apresentar as técnicas utilizadas no mapeamento de precisão como ferramenta estratégica aos estudos dos processos costeiros sazonais intensos (erosão, transporte, balanço e suprimento sedimentares) e da dinâmica costeira de curta duração num trecho do Litoral Setentrional do RN. Para isso, pontos amostrais planialtimétricos de LC e superfícies de praia foram coletados trimestralmente em campo e inseridos numa base de dados digital georreferenciada, sobre a qual foram gerados e representados os modelos de LC e MDE, assim como de suas variações temporais. A comparação entre as LC e os MDE permite a identificação e a mensuração das variações das LC e das áreas e volumes de erosão/acresção, o cálculo do volume e da orientação do transporte de sedimentos na LC e nas superfícies de praias, além subsidiar a análise do balanço e do suprimento sedimentares.

Em relação aos métodos tradicionais de representação da dinâmica costeira, os mapeamentos digitais georreferenciados de alta precisão apresentam a vantagem da localização geográfica das alterações ocorridas nas LC e nas superfícies de praia, importantes na tomada de decisão quanto

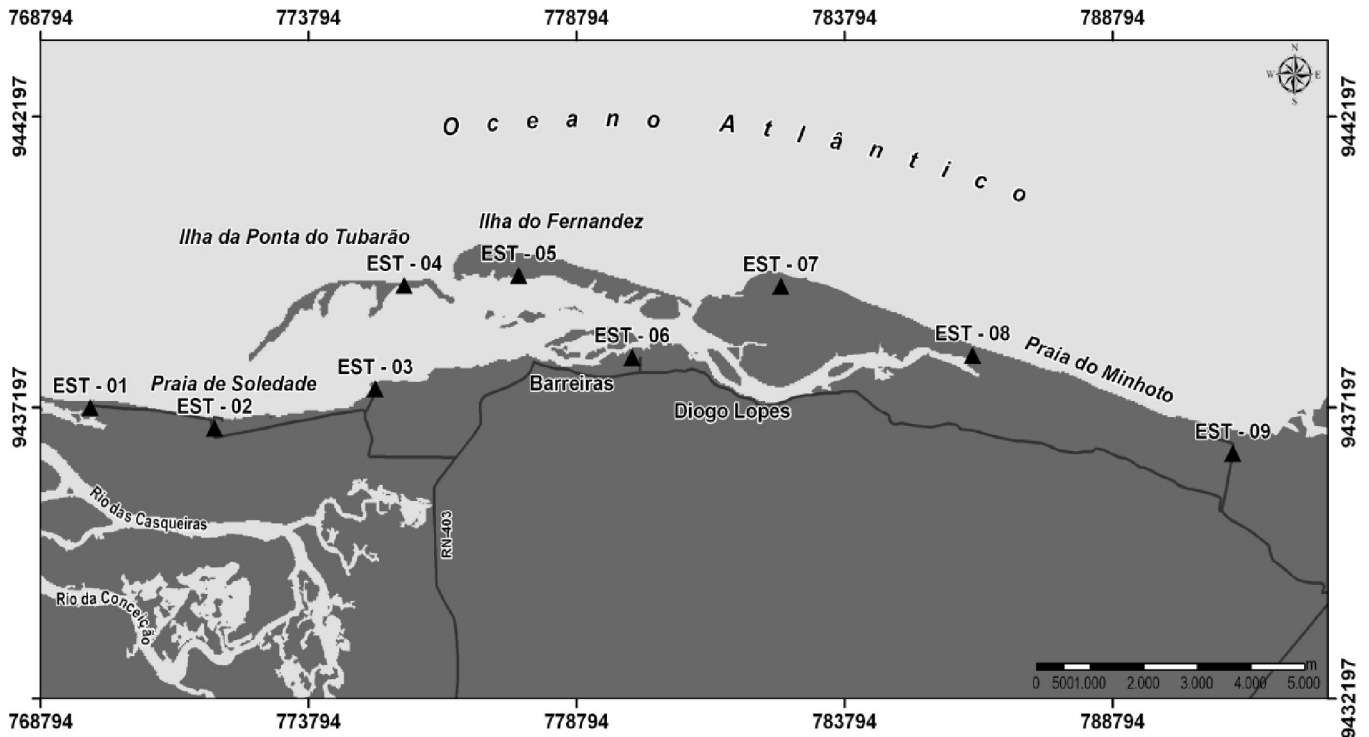


Fig. 1 - Mapa da área de estudo com a localização geográfica dos quatro trechos utilizados nos monitoramentos costeiros (Praia de Soledade, Ilha da Ponta do Tubarão, Ilha do Fernandez, e Praia do Minhoto) e das nove estações da Rede Geodésica do Litoral Setentrional (EST-01 a EST-09). Modificado de Santos (2011) e Santos e Amaro (2011).

a intervenções antrópicas de mitigação de impactos ambientais por parte dos gestores costeiros. A partir do mapeamento podem ser gerados mapas de áreas de risco, definidas as áreas prioritárias às intervenções antrópicas e a seleção de novas áreas em caso de remoção de moradores, entre outras opções mitigadoras. No entanto, a integração entre os levantamentos executados em locais e épocas diferentes só foi possível devido ao georreferenciamento de alta precisão dos pontos amostrais em campo, o que permitiu a comparação de mapas em escala multitemporal, mas com a mesma base de dados georreferenciada. Nesse caso, como o referencial geodésico utilizado foi unívoco, fixo e relativamente estável no tempo, as relações espaciais entre os elementos mapeados foram preservadas.

## 2. Levantamento Geodésico de Áreas Costeiras

Para o monitoramento costeiro de curta duração (periodicidade sazonal), os levantamentos geodésicos têm sido realizados trimestralmente,

conforme as quatro estações do ano, considerando os parâmetros dinâmicos costeiros (ondas, ventos, correntes e marés), o que permite a correlação entre as variações temporais medidas e a atuação desses agentes. No mapeamento das variações temporais, os pontos amostrais de LC e das superfícies de praia colhidos em campo foram integrados numa única base de dados digital georreferenciada, fato que permite a integração adequada entre os levantamentos costeiros executados em locais e épocas diferentes. Os levantamentos seguem os seguintes preceitos: boa precisão, referencial geodésico unívoco, fixo e relativamente estável no tempo, e indicador de LC adequado. Tais características serão consideradas na metodologia apresentada a seguir.

### 2.1 Aquisição de dados geodésicos

A aquisição de dados para a geração de um MDE em áreas costeiras deve ser feita em duas etapas (Santos *et al.* 2011):

(i) o levantamento da LC, que define o limite externo do modelo, e (ii) o levantamento das superfícies de praia, que definem a área interna ao modelo. Na LC, são coletados pontos topográficos planialtimétricos ao longo dos perfis longitudinais que a definam. Neste trabalho, a LC foi definida como o alcance máximo da linha d'água na maré de quadratura em preamar, ou seja, o limite do espraiamento das ondas na face de praia, como a sugestão de Souto (2009). Nas superfícies de praia, levantadas logo após as LC, pontos topográficos planialtimétricos são coletados 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, como os campos de dunas móveis ou fixas (Baptista *et al.* 2008).

O método de posicionamento planialtimétrico utilizado foi o relativo cinemático do *Global Positioning System* (GPS), 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), conforme Monico (2007). Como referências, foram utilizadas as estações da Rede GPS do Litoral Setentrional do RN (RGLS), implantada na área de estudo para fornecer linhas de base curtas ao posicionamento GPS (menores do que 3,5 km) em toda a área de estudo (Fig. 1, Santos & Amaro, 2011). Os receptores utilizados foram do modelo *TrimbleR3*, que rastreiam observações da fase da onda portadora na frequência L1 e possuem precisão nominal horizontal de 5 mm + 1 ppm e vertical de 5 mm + 2 ppm. Para permitir o levantamento de extensas áreas em reduzidos intervalos de tempo, o receptor móvel foi acoplado a um quadriciclo motorizado e foi programado para coletar dados em função do tempo com intervalo de gravação de 1s.

## 2.2 Processamento de dados geodésicos

Como as altitudes ortométricas foram determinadas a partir das geométricas (obtidas por *Revista de Geologia, Vol. 25 HIDROSEMA-UFRN, 2012*

GPS), o processamento dos dados coletados em campo consistiu em duas etapas: 1) determinação das coordenadas geodésicas; e 2) determinação das altitudes ortométricas.

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 V: 6.04*. Nos processamentos, as estações da RGLS foram fixadas como referência, proporcionando sempre linhas de base curtas (menores do que 3,5 km). Foram empregadas 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 (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 Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) (Seeber, 1993; Monico, 2007).

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 revolução adotado no posicionamento. Isso foi feito através da altimetria por GPS no modo relativo, na qual, a altitude ortométrica de um ponto de interesse ( $j$ ) 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 ( $\Delta h_j = h_A - h_j$ ) determinadas pelo GPS e das diferenças de alturas geoidais ( $\Delta N_j = N_A - N_j$ ) determinadas a partir de um modelo geoidal, com base na Equação 1 (Featherstone *et al.*, 1998; Ollikainen, 1998; Santos & Sá, 2006):

$$H_j = H_A + \Delta H_j = H_A + (\Delta h_j - \Delta N_j) \quad (\text{Equação 1})$$

Com referência à altimetria foram utilizadas estações de referência da RGLS, as quais possuem coordenadas geodésicas e altitudes ortométricas conhecidas, e o modelo geoidal do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), modelo MAPGEO2004 (IBGE, 2011). No cálculo das altitudes foi utilizado o aplicativo desenvolvido em Santos & Amaro (2011), que calcula a altitude de um ponto pela média aritmética das altitudes calculadas pelas estações mais próximas da RGLS.

### 2.3 Quantidades de áreas realizadas nos levantamentos

Em termos quantitativos, as LC e as superfícies de praia foram coletadas com amostras de pontos com coordenadas geodésicas de alta densidade e boa distribuição espacial. Por exemplo, em Fevereiro/2011, 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 10h 30min, resultando em densidades de 43,41 pontos/minuto ou 98,96 pontos/hectare. Esta alta produtividade na aquisição de dados só foi possível 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 (Seeber 1993; Monico 2007).

## 3. Mapeamento da Dinâmica Costeira

Os mapeamentos da dinâmica costeira têm o intento de representar a morfologia e a variação temporal das regiões costeiras, nas componentes

planimétrica e planialtimétrica, servindo como ferramenta estratégica no entendimento e análise dos processos costeiros (erosão, transporte e acreção sedimentar) em episódios de curta duração acompanhando as flutuações sazonais intra-aneais.

### 3.1 Linhas de Costa (LC) de Referência

A LC pode ser representada pelo mapa de linha de costa, com a visualização geral das formas, dimensões e orientações das LC, gerados pela união (em ambiente CAD) dos pontos geodésicos planialtimétricos coletados em campo ao longo da LC. Como ilustração, a Figura 2 apresenta 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 Maio/2010 (Fig. 1). A geração do mapa de LC foi realizada com auxílio do programa *Topograph* versão 3.78, da *Chair Pointer Tecnologia*. Como indica a Figura 2, as LC das praias e ilhas barreiras possuem forma predominante de arcos côncavos, orientadas aproximadamente na direção leste-oeste, e com três trechos de inflexão. Ao norte, as praias e ilhas barreiras são limitadas pelo Oceano Atlântico, estando expostas aos ventos, ondas e correntes de maré e de mar aberto. No limite sul, as ilhas barreiras estão protegidas da ação do mar aberto, formando os estuários de Barreiras e Diogo Lopes (Fig. 1). Para as praias oceânicas, o limite sul é o continente e a largura da faixa de praia monitorada variou em função das feições morfológicas encontradas em cada trecho de litoral analisado.

### 3.2 Variações superficiais das LC

A dinâmica da LC pode ser representada por um diagrama que mostra os recuos e avanços da LC no litoral. Tais variações são calculadas por meio de transectos, que são linhas imaginárias estabelecidas ao longo da costa em distâncias regulares e perpendicularmente a uma linha base, posicionadas virtualmente no continente ou no mar, sendo paralelas à LC atual. Para um determinado local, o transecto de uma LC consiste na distância entre a LC e a linha base. Assim, a variação entre duas LC é calculada pela subtração dos transectos,

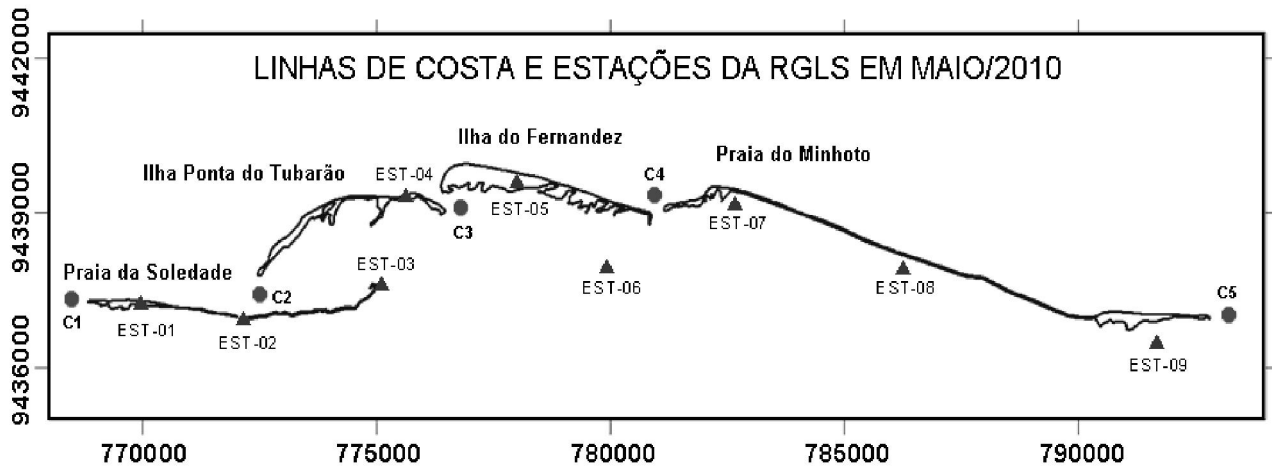


Fig.2. Linhas de costa definidas nas praias oceânicas, ilhas barreiras e canais de maré monitorados na área de estudo na época de referência (Maio/2010). Linhas contínuas definem as linhas de costa. Triângulos representam as estações da RGLS. Círculos indicam a localização dos canais de maré: C1 é o Canal do Corta Cachorro, C2 é o Canal da Soledade, C3 é o Canal da Ponta do Tubarão, C4 é o Canal do Fernandez e C5 é o Canal do Minhoto.

ou seja, é a distância entre as duas LC ao longo do alinhamento do transecto. As seguintes convenções são utilizadas: valores negativos representam recuo da LC ou erosão; e, valores positivos representam avanço da LC ou acresção. A Figura 3A ilustra a LC na época de referência para Maio/2010 e o gráfico das variações de LC ocorridas na Ilha da Ponta do Tubarão, em intervalos trimestrais de monitoramento durante o ano de 2010. Os cálculos das variações das LC por transectos foram realizados no modo semiautomático, com auxílio do programa *Topograph* versão 3.78, da *Chair Pointer Tecnologia*.

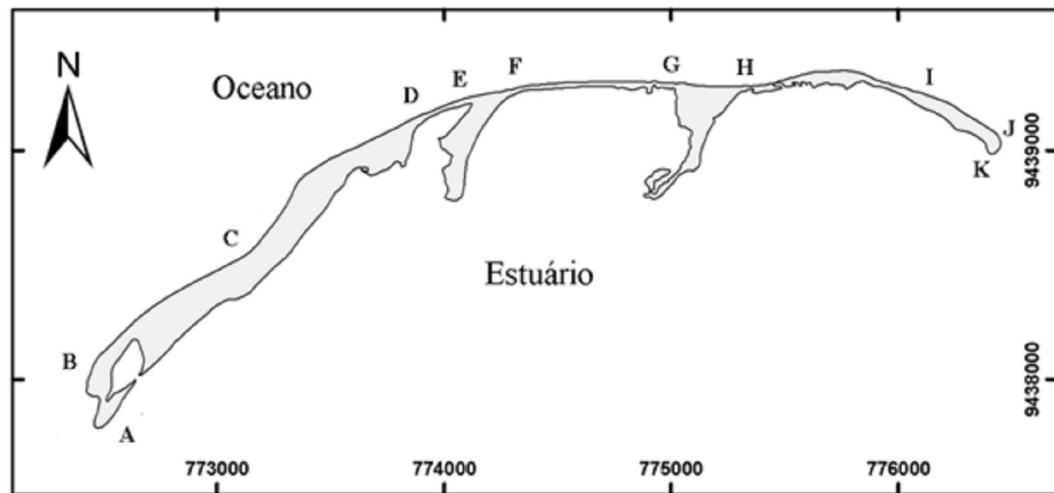
O gráfico de variação da LC (Fig. 3B) mostra o padrão de distribuição das variações trimestrais, relevantes para o reconhecimento dos processos costeiros sazonais ocorridos ao longo do ano e que foram responsáveis pelo estágio resultante anual. No gráfico, é possível observar a localização espacial (a partir de pontos de controle) e as magnitudes dos recuos e avanços da LC para os trechos monitorados. Para efeito de análise, as LC foram compartimentadas em segmentos expostos e abrigados das ondas de mar aberto, sobre os quais foram calculadas as médias das variações (Fig. 3C). As feições consideradas foram: as praias oceânicas, expostas às ondas, correntes de maré e correntes de deriva litorânea; os canais de maré, submetidos às ondas e às correntes de maré; e os

limites internos dos estuários, submetidos às correntes de maré e ondas. Por exemplo, no segundo intervalo de monitoramento apresentado na Fig. 3, as resultantes mostram recuo da LC nas praias expostas e nos estuários, e avanço da LC nos canais de maré, o que sugere a atuação dos agentes dinâmicos costeiros no transporte sedimentar do intervalo destrutivo. A alta energia das ondas nesse intervalo mobilizaram sedimentos nas LC das praias expostas e, provavelmente, os colocaram em suspensão, o que permitiu que a corrente de deriva litorânea transportasse os sedimentos no sentido oeste, e as correntes de maré de vazante e os ventos transportaram sedimentos para fora dos estuários.

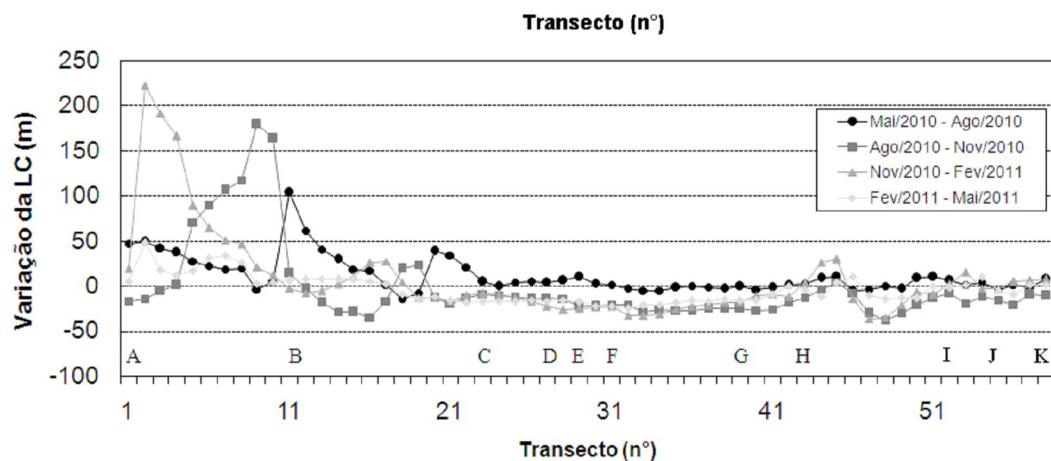
### 3.3 Mapa de áreas de erosão/ acresção

A dinâmica da LC pode ser representada por mapa de áreas de erosão/acresção, com a localização espacial das áreas correspondentes aos recuos e avanços da LC ao longo do trecho de litoral estudado. Tais mapas são gerados pela intersecção geométrica dos polígonos formados pelas LC envolvidas no monitoramento. Para duas LC obtidas ao longo do tempo (épocas inicial e final), as variações temporais das LC são representadas em forma de polígonos adicionados (acresção),

(A)



(B)



(C)

SEGMENTOS	INTERVALOS DE MONITORAMENTO				
	ANUAL	Primeiro (M-A/2010)	Segundo (A-N/2010)	Terceiro N-2010/F-2011	Quarto F-M/2011
AB (Canal de maré)	+196,1	+33,4	+64,1	+80,1	+18,4
BJ (Praia exposta)	-30,5	+6,5	-17,2	-10,2	-9,5
JK (Canal de maré)	-7,3	+2,4	-13,5	+6,0	-2,2
KA (Estuário)	+11,2	+6,3	-14,2	+14,1	+5,1
<b>TOTAL</b>	<b>+12,3</b>	<b>+8,7</b>	<b>-8,4</b>	<b>+11,1</b>	<b>+0,9</b>

Fig. 3. Variações na linha de costa da Ilha da Ponta do Tubarão. A) Linha de costa de referência, em Maio/2010; B) Variações trimestrais das linhas de costa nos quatro intervalos de monitoramento; C) Médias das variações de LC em função do intervalo de monitoramento (Maio-Agosto/2010; Agosto-Novembro/2010; Novembro/2010-Fevereiro/2011, Fevereiro-Maio/2011) e do tipo de segmento de LC. O setor Norte (ponto A ao K) é canal de maré e praia exposta enquanto o setor Sul (ponto K ao A) é estuário do canal de maré.

removidos (erosão) e inalterados (estabilidade) em relação ao polígono da LC inicial. A Figura 4 apresenta o mapa de erosão/acresção ocorridos na Ilha da Ponta do Tubarão, acumulados ao longo dos intervalos trimestrais de monitoramento (Figura 3). Os mapas de erosão/acresção foram gerados com auxílio do programa ArcGIS, versão 9.2, da ESRI.

O mapa de áreas de erosão/acresção é importante para identificar e localizar tendências de variações das LC e a recuperação das praias ao longo do intervalo anual de monitorado (Fig. 4). Por exemplo, é possível visualizar a direção da remoção, transporte e acresção de sedimentos ao longo da LC no sentido de leste para oeste, mesmo sentido da corrente de deriva litorânea, e o deslocamento da ilha no sentido norte-sul, de acordo com a seta com sinal positivo da Figura 4. No exemplo apresentado ocorreu uma resultante de acresção no intervalo, ou seja, maiores áreas de deposição do que de erosão ao longo do intervalo de monitoramento. No entanto, a Figura 4 indica que a resultante de acresção ocorreu devido ao fato da soma das áreas de acresção nos canais de maré e estuários e ao deslocamento da ilha no sentido norte-sul terem sido maiores do que as áreas de erosão nas praias expostas.

### 3.4 Representação do relevo por MDE

O relevo da área estudada foi representado por MDE, com a representação planialtimétrica dos planos, inclinações, elevações e depressões. Na geração dos MDE foi utilizada a interpolação por triangulação do modelo *Triangulated Irregular Network* (TIN), 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. Os pontos foram conectados de acordo com a triangulação de Delaunay, que usa o critério da maximização dos ângulos mínimos de cada triângulo. Assim, a malha final contém triângulos o mais próximos possível de equiláteros, evitando-se a criação de triângulos com ângulos internos muito agudos (Matos, 2005; Zanardi, 2006). A Figura 5 representa o MDE da Ilha da Ponta do Tubarão, com curvas de nível em

equidistância vertical de 0,5 m, compatível com a acurácia dos modelos. Na aplicação do método TIN com a triangulação de Delaunay foi utilizado o *software* ArcGIS, versão 9.2, da ESRI.

Na Figura 5 nota-se que o relevo da área é relativamente plano, com a maioria das altitudes concentradas entre 1 e 3 m, ou seja, amplitude de 2 m (95 % das altitudes tiveram valores entre 1 e 3 m, 2 % inferiores a 1 m e 3 % superiores a 3 m). No trecho modelado foi notado um padrão na distribuição do relevo, que variou principalmente em função do grau de exposição das LC às ondas de mar aberto. A margem norte (praia exposta às ondas de mar aberto) apresentou as maiores altitudes, enquanto a margem sul (estuário abrigado) as menores altitudes. Nas praias expostas, esse padrão de relevo ocorreu porque 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. No entanto, nas áreas estuarinas a ausência das ondas de mar aberto provoca pouca variação horizontal nas LC e cria um ambiente que gera LC com altitudes mais baixas. O modelo permitiu 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 em erosão, como escarpas em bermas e dunas frontais.

### 3.5 Mapa volumétricos de erosão/ acresção

A dinâmica planialtimétrica da LC e das superfícies de praia pode ser representada em mapas volumétricos de erosão/acresção, com a localização espacial dos volumes correspondentes às perdas e ganhos altimétricos de sedimentos em todo o trecho monitorado. As variações do relevo foram calculadas pelo método da álgebra de mapas, pela subtração entre os MDE. No método, os modelos envolvidos nos cálculos são convertidos para o formato matricial, em que a cada pixel da imagem é atribuído um valor de altitude (por interpolação dos dados de origem) e comparados em uma mesma base de dados georreferenciada. A subtração dos



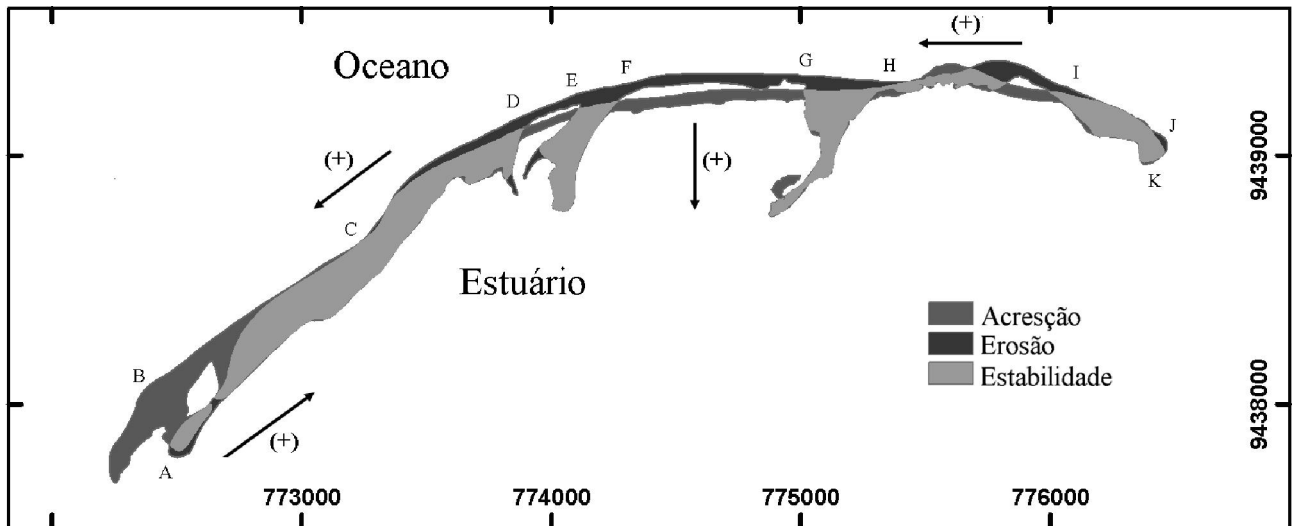


Fig. 4. Variações temporais acumuladas ao longo do episódio de monitoramento (Maio-2010/Maio-2011), em mapa de erosão/acresção/estabilidade.

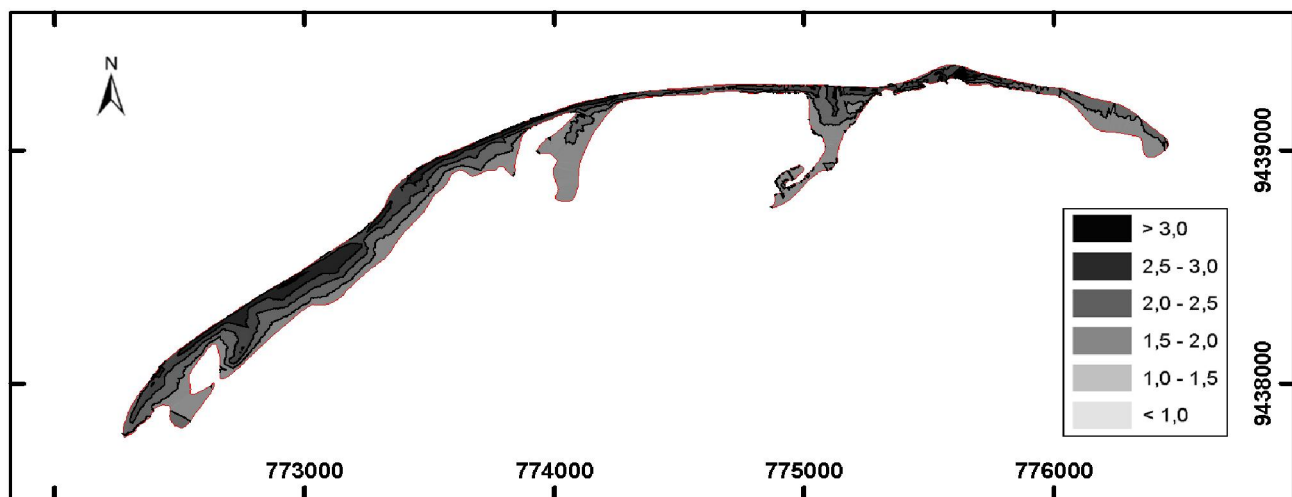


Fig. 5 - Modelo Digital de Elevação da Ilha da Ponta do Tubarão para Fevereiro/2011. A equidistância vertical das curvas de nível é de 0,5m.

modelos é então efetuada pixel-a-pixel, mantendo-se a integridade das informações espaciais. Quanto menor a área representativa do pixel na superfície do terreno, melhor a precisão do método. As seguintes convenções foram utilizadas: valores negativos representam perda altimétrica (erosão) e valores positivos representam ganho altimétrico (acresção). A Figura 6 apresenta as variações volumétricas ocorridas na Ilha da Ponta do Tubarão para intervalo trimestral entre Novembro/2010 e Fevereiro/2011, de acordo com a compartimentação das variações volumétricas em LC, superfícies internas às praias e ilhas barreiras, e a componente resultante. Os mapas das variações dos MDE por álgebra de mapas foram realizados com auxílio do

programa ArcGIS, versão 9.2, da ESRI.

Os mapas de volumes de erosão/acresção foram importantes na identificação da localização geográfica das variações sedimentares na área de estudo, tanto para a LC (Fig. 6A) quanto para as superfícies de praia (Figura 6B), além da combinação entre ambas (Fig. 6C). No exemplo da Figura 6, as análises das variações volumétricas nas LC e na superfície interna à ilha foram importantes para a verificação de quais fluxos dominaram o transporte sedimentar, se o hidrodinâmico na LC ou o eólico nas superfícies da ilha. Nesse caso, a resultante (soma dos volumes de erosão e acresção) indicou de acresção na LC e erosão nas superfícies de praia. Ainda, devido ao maior volume de acresção nas LC

em relação ao volume de erosão nas superfícies da ilha, a resultante para o intervalo de monitoramento foi de acresção, o que mostrou maior influência no

balanço sedimentar da hidrodinâmica na LC em relação á eólica na superfície.

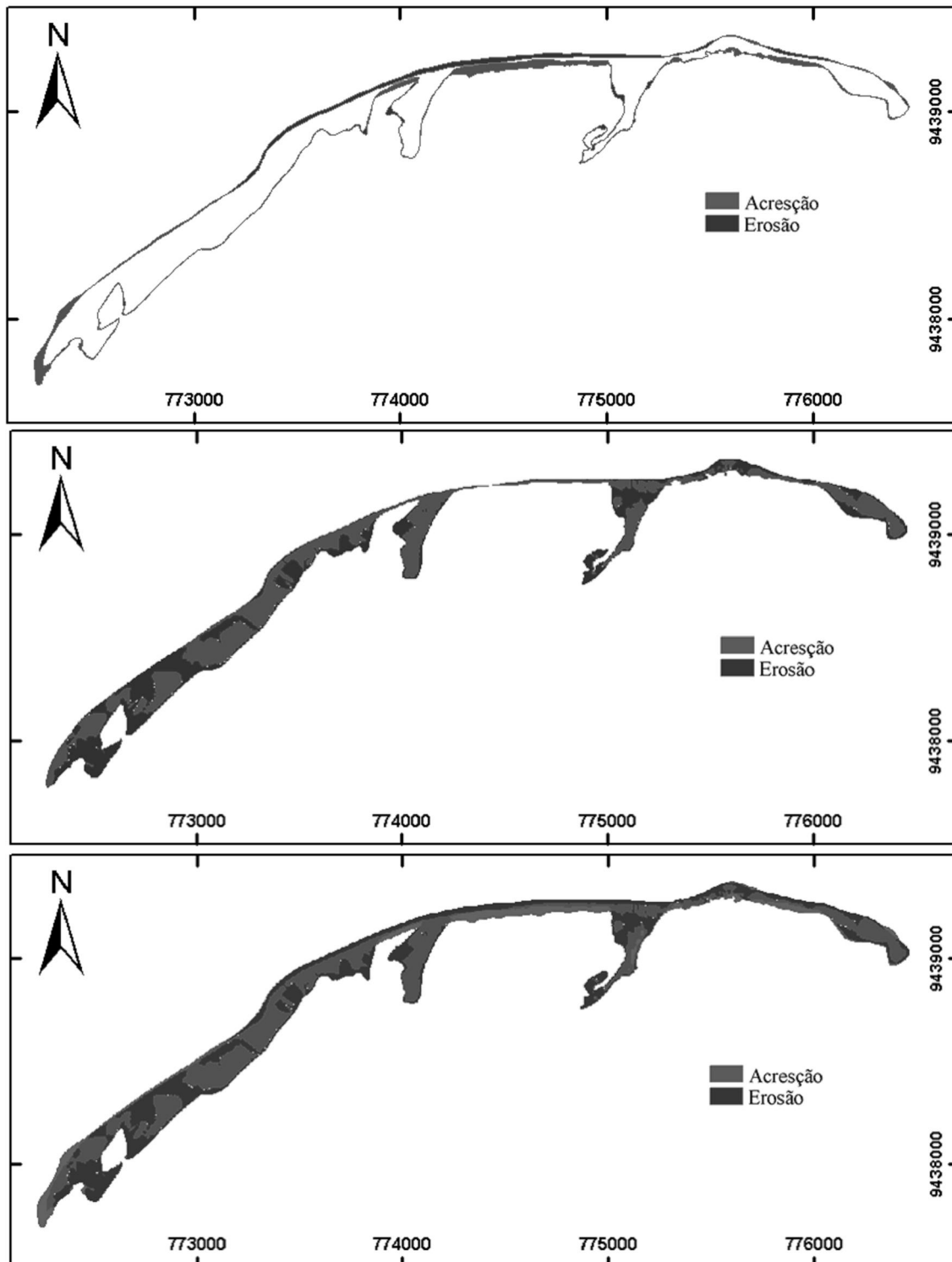
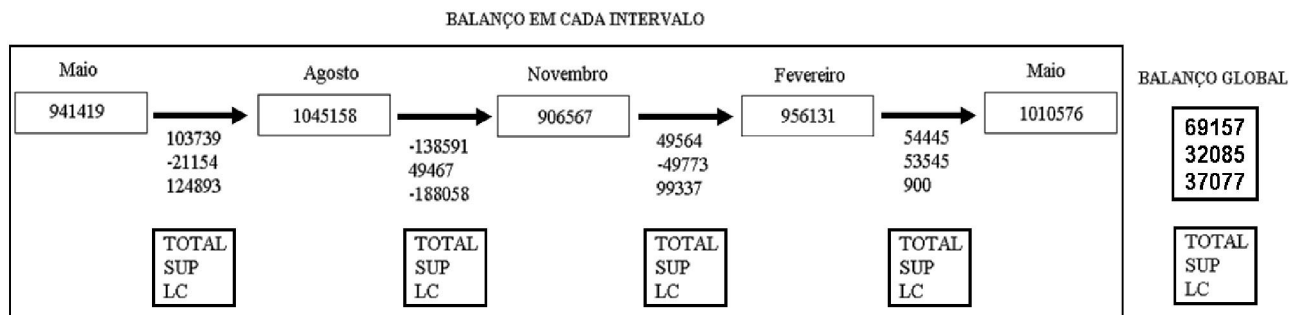


Fig. 6 - Variações temporais volumétricas ocorridas: (A) na LC; (B) nas superfícies de praia, e (C) resultado da combinação das duas componentes (LC e superfícies), no intervalo trimestral entre Novembro-2010/Fevereiro-2011. A equidistância vertical das curvas de nível é de 0,5m.

### 3.6 Fluxograma do balanço sedimentar volumétrico

Os resultados quantitativos das variações volumétricas obtidos nos mapas de volumes de erosão/acresção podem ser apresentados, de maneira sintetizada, a partir do fluxograma do balanço sedimentar volumétrico que mostra os valores de acresção/erosão volumétrica ocorridos nos intervalos de monitoramento, permitindo o cálculo e análises do balanço sedimentar. A Figura 7 ilustra o fluxograma do balanço sedimentar volumétrico da Ilha da Ponta do Tubarão, na qual as variações em volume foram apresentadas de acordo com a compartimentação nas LC, nas superfícies das praias ou ilhas, e total (superfícies e LC). Assim como no mapa de volume de erosão/acresção, o fluxograma permite a análise de quais

fluxos dominaram o transporte sedimentar, se o hidrodinâmico na LC ou o eólico na superfície da praia ou ilha. Além disso, no fluxograma tem-se uma visão geral de toda a área de estudo no decorrer dos diversos intervalos de monitoramento. Por exemplo, no intervalo entre Agosto/2010 e Novembro/2010, o balanço sedimentar volumétrico (Fig. 7) teve resultante final de erosão devido ao maior volume de erosão na LC em relação ao volume de acresção nas superfícies da ilha, o que demonstrou a maior influência da hidrodinâmica na LC em relação à eólica na superfície. Ainda, as resultantes de acresção nas superfícies das praias e ilhas e de erosão nas LC indicaram a atuação de ventos de alta intensidade que transportaram parte dos sedimentos erodidos nas LC para o interior, indicado pelo acúmulo nas superfícies volumétricas.



*Figura 7. Fluxograma indicativo do balanço sedimentar em termos de erosão (seta vermelha) e acresção (seta azul) volumétrica (unidade em m<sup>3</sup>) para a Ilha da Ponta do Tubarão nos quatro intervalos de monitoramento (Maio-2010/Maio/2011, trimestralmente). O balanço em cada intervalo é a soma dos volumes de erosão e acresção no intervalo, considerando o sinal da variação. O balanço global é a soma dos volumes de erosão e acresção em todos os intervalos de monitoramento. De cima para baixo, os valores apresentados abaixo de cada seta horizontal representam o volume total (superfície e linha de costa), o volume na superfície da ilha, e o volume na linha de costa.*

## 4. Conclusões

Este trabalho apresentou as técnicas utilizadas no mapeamento de precisão da dinâmica costeira de curta duração, em episódios intra-anuais, de um trecho do litoral setentrional do RN, como ferramenta estratégica aos estudos de erosão, transporte e balanço sedimentar. Para isso, os pontos amostrais planialtimétricos de LC e superfícies, coletados em campo trimestralmente, foram inseridos em uma base de dados digital georreferenciada de alta precisão, sobre a qual

foram representados os modelos de LC e MDE e de suas variações temporais. Os mapeamentos foram realizados nas componentes planimétrica e planialtimétrica. A componente planimétrica foi representada pelo mapa de LC intra-anual, pelo diagrama de variação da LC, e pelo mapa de áreas de erosão/acresção. O mapa de LC intra-anual, gerado pela interação entre os pontos geodésicos planialtimétricos coletados em campo ao longo da LC, revelou a morfologia geral das feições, as dimensões e a orientações das LC. O gráfico de variação da LC, calculadas pelo método dos

transectos, mostrou a localização espacial (a partir de pontos de controle) e as magnitudes dos recuos e avanços da LC ocorridos ao longo do trecho monitorado. O mapa de áreas de erosão/acresção, obtidos pela intersecção geométrica dos polígonos formados pelas LC envolvidas no monitoramento, indicou a localização espacial das áreas correspondentes aos efeitos de recuos e avanços da LC.

A componente planialtimétrica foi representada pelo MDE, mapa de volume de erosão/acresção, e fluxograma do balanço sedimentar volumétrico. O MDE, obtido na interpolação por triangulação com método TIN, mostrou a variação das altitudes e o padrão de distribuição espacial do relevo que variou, sobretudo em função do grau de exposição das LC às ondas de mar aberto, além de permitir a identificação das principais feições morfológicas típicas de zonas de praia, tais como os perfis de praia emersa, as bermas e as cristas de bermas, as dunas frontais, os campos de dunas, os planos horizontais e inclinados, as depressões e as elevações, além de feições morfológicas em erosão, como escarpas em bermas e dunas frontais. O mapa de volumes de erosão/acresção, calculadas pela subtração entre os MDE com o método da álgebra de mapas, mostrou a localização espacial dos volumes correspondentes às perdas e ganhos altimétricos de sedimentos em todo o trecho monitorado, tanto na LC quanto nas superfícies de praia. O fluxograma volumétrico do balanço sedimentar, gerado a partir do cálculo das variações volumétricas ocorridas nos mapas de volumes de erosão/acresção mostrou de modo sintetizado os valores de acresção e erosão volumétricas (nas LC e nas superfícies de praia) ocorridas nos diversos intervalos temporais de monitoramento, permitindo o cálculo e análises do balanço sedimentar.

Portanto, o mapeamento sistemático das variações temporais ocorridas entre LC e MDE permitiu a identificação e a medição da variação da LC e das áreas e volumes de erosão/acresção, cálculo do volume e da orientação do transporte de sedimentos na LC e nas superfícies de praias, além da análise do balanço e do suprimento sedimentares. Assim, o uso dessas técnicas de mapeamento de

alta precisão da dinâmica costeira, nas componentes planimétrica e planialtimétrica, permitiu o realce e a visualização das pequenas variações sazonais ocorridas na escala de tempo intra-anual, auxiliando no entendimento e análise da dinâmica costeira de curta duração (erosão, transporte e acresção sedimentar).

### **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, MOLECO e CRONALOG. As atividades foram desenvolvidas com o apoio logístico do Laboratório de Geoprocessamento do Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica e do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (GEOPRO/PPGG/DG/UFRN). Os autores agradecem a CAPES pela concessão de Bolsa de Doutorado ao primeiro autor no Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia do Petróleo (PPGCEP/UFRN). Especial agradecimento aos revisores pelas relevantes contribuições ao texto final.

### **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
- Chaves, M. S. **Dinâmica costeira dos campos petrolíferos Macau/Serra, Litoral Setentrional do Rio Grande do Norte**. 2005. 135f. Tese (Doutorado em Geodinâmica e Geofísica) – Departamento de Geologia, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Natal.
- Chaves, M.S.; Vital, H.; Silveira, I.M. Beach morphodynamics of the Serra oil field, northeastern Brazil. **Journal of Coastal Research**, SI 39. p. 594-597, 2006.

- 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 accurated determination of orthometric heights from GPS. **Survey Review**, v.34, p.278-295, 1998.
- Franco, C.G.M. **Prognóstico da erosão costeira no litoral setentrional do rio grande do norte para os anos de 2020, 2030 e 2040. 2010.** 92f. Monografia (Graduação em Geologia) – Graduação em Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- 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](http://www.ibge.gov.br) Acesso: 01 janeiro 2011.
- Klemas, V. Remote Sensing Techniques for Studying Coastal Ecosystems: An Overview. **Journal of Coastal Research**, v. 27, n. 2, p. 2-17, 2011.
- 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.
- Nascimento, M.C. **A erosão costeira e sua influência sobre a atividade petrolífera: alternativas sustentáveis na mitigação de impactos ambientais.** 2009. 229f. Dissertação (Mestrado em Geodinâmica e Geofísica). Departamento de Geologia, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica da UFRN, Natal.
- 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.
- 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.469-483, 2011.
- Santos, M.S.T. & Amaro, V.E. Rede geodésica para o monitoramento ambiental costeiro do litoral setentrional do Estado do Rio Grande do Norte. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v.17, n.4, p.571-585, 2011.
- Santos, M.S.T.; Sá, N.C de. O uso do GPS em levantamentos geofísicos terrestres. **Revista Brasileira de Geofísica**, v.24, n.1, p.63-80, 2006.
- Seeber, G. **Satellite Geodesy: Foundations, methods and applications.** Walter de Gruyter, N. York, p.531, 1993.
- Souto, M.V.S. **Análise da evolução costeira do Litoral Setentrional do Estado do Rio Grande do Norte, região sob influência da indústria petrolífera.** 2009. 177f. Tese (Doutorado em Geodinâmica e Geofísica) – Departamento de Geologia, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- 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.