



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA E GEOQUÍMICA**

---

**TESE DE DOUTORADO**

**MORFOLOGIA E DINÂMICA DE MÉDIO (1958-2010) E CURTO (2007)  
PERÍODOS DA PLANÍCIE COSTEIRA DE ALMOFALA, MUNICÍPIO  
DE ITAREMA, CEARÁ**

**Tese apresentada por:**

**PONCIANA FREIRE DE AGUIAR**

**Orientador: Prof. Dr. Maamar El Robrini (UFPA)**

---

**BELÉM  
2011**

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

---

A282m Aguiar, Ponciana Freire de  
Morfologia e dinâmica de médio (1958-2010) e curto (2007)  
períodos da planície costeira de Almofala, Município de Itarema,  
Ceará / Ponciana Freire de Aguiar; Orientador: **Maamar El Robrini**  
– 2011  
xxi, 179 f. : il.

Tese (Doutorado em Geologia) – Programa de Pós-Graduação em  
Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade  
Federal do Pará, Belém, 2011.

1. Unidades e subunidades geomorfológicas. 2. Planície Costeira.  
3. Multitemporal. 4. Morfodinâmica praias. 5. Zoneamento  
geoambiental. 6. Almofala (CE). I. **El Robrini**, Maamar, *orient.* II.  
Universidade Federal do Pará. III. Título.

CDD 20. ed.: 551.41098131

---



**Universidade Federal do Pará**  
**Instituto de Geociências**  
**Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica**

**MORFOLOGIA E DINÂMICA DE MÉDIO (1958-2010) E CURTO  
(2007) PERÍODOS DA PLANÍCIE COSTEIRA DE ALMOFALA,  
MUNICÍPIO DE ITAREMA, CEARÁ**

**TESE APRESENTADA POR:**

**PONCIANA FREIRE DE AGUIAR**

**Como requisito parcial à obtenção do Grau de Doutor em Ciências na Área de  
GEOLOGIA**

**Data de Aprovação: 24/05/2011**

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Dr. MAAMAR EL ROBRINI  
(Orientador – UFPA)

---

Prof. Dr. GEORGE SATANDER SA-FREIRE  
(Membro – UFC)

---

Prof. Dr. VENERANDO EUSTAQUIO AMARO  
(Membro – UFRN)

---

Prof. LUIZ PARENTE MAIA  
(Membro – UFC)

---

Prof. NILS EDVIN ASP NETO  
(Membro – UFPA)



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA E GEOQUÍMICA

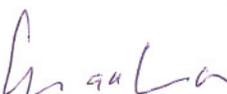
## PARECER

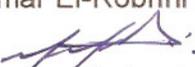
### Sobre a Defesa Pública da Tese de Doutorado de PONCIANA FREIRE DE AGUIAR

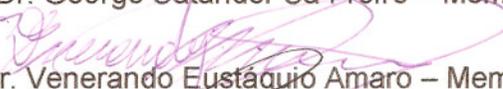
A banca examinadora da tese de doutorado de **PONCIANA FREIRE DE AGUIAR** intitulada "**MORFOLOGIA E DINÂMICA DE MÉDIO (1958-2010) E CURTO (2007) PERÍODOS DA PLANÍCIE COSTEIRA DE ALMOFALA, MUNICÍPIO DE ITAREMA, CEARÁ**", composta pelos Professores Doutores Maâmar El-Robrini (Orientador-UFPA), George Satander Sá Freire (UFC), Venerando Eustáquio Amaro (UFRN), Luis Parente Maia (UFC), Nils Edvin Asp Neto (UFPA), após a apresentação oral e arguição da candidata, emite o seguinte parecer:

- A Tese foi aprovada por unanimidade;
- A apresentação oral foi satisfatória;
- A candidata respondeu a maior parte dos questionamentos feitos pela banca;
- Os trabalhos submetidos devem considerar melhor o aspecto formal da metodologia de sensoriamento remoto e geoprocessamento e a influencia das marés e do balanço sedimentar costeiro na evolução de médio a curto período da planície costeira de Almofoala.

Belém, 24 de maio de 2011.

  
Prof. Dr. Maâmar El-Robrini - Membro (Orientador-UFPA)

  
Prof. Dr. George Satander Sá Freire – Membro (UCF)

  
Prof. Dr. Venerando Eustáquio Amaro – Membro (UFRN)

  
Prof. Dr. Luis Parente Maia – Membro (UFC)

  
Prof. Dr. Nils Edvin Asp Neto – Membro (UFPA)

*“How many roads must a man walk down  
Before you call him a man?  
How many seas must a white dove sail,  
Before she sleeps in the sand?  
Yes and how many times must cannonballs fly  
Before they’re forever banned?  
The answer my friend, is blowin’ in the wind.  
Yes and many years can mountain exist  
Before it’s worts to the sea?  
Yes and how many years can some people exist,  
Before they’re allowed to be free?  
Yes and how many times can a man turn his head  
Pretend that he just doesn’t see?  
The answer my friend, is blowin’ in the wind.  
Yes and how many times must a man look up  
Before he can see the sky?  
Yes and how many ears must one man have,  
Before he can hear people cry?  
Yes and how many deaths will it take till he knows,  
That too many people have died?  
The answer my friend, is blowin’ in the  
wind.”*

Bob Dylan (1963)

*Às minhas filhas Cleyciana e Ana Luna  
Dedico.  
Aos meus pais Pedro Albino e Antônia Vera,  
Ofereço.*

## EPÍGRAFE

Renascer do Pai...  
Como a floresta destruída,  
ainda que queimada  
encontra forças para se recuperar!

Como as flores que nascem  
nas rochas, nos desertos e penhascos,  
como os lírios encontram vida  
nos jarros, nos cantos e nos campos!

Como a Vitória Régia e exuberante  
nasce no coração do Mundo  
nas águas amazônicas, rasas, ricas de vida...  
ou nas águas de solo profundo!

Como em solo cimentado  
De uma roseira nasce uma rosa,  
depois de seguir caminhos tortuosos  
a flor enfim desabrocha!

Como a flor que nasce em Hiroshima  
e também as flores de Nagasaki,  
provando que pode nascer a vida...  
mesmo depois da morte!

Como a flor da madrugada cresce  
da pureza, da leveza e do amor!  
e se multiplica e resplandece...  
mostrando a existência do Criador!

Como a flor que nasce depois do fogo,  
Mesmo que sem sentido,  
consegue incendiar o desamparado...  
coração triste e ressentido!

Como as flores e os cheiros...  
que vem do amanhecer do jasmim,  
conseguem fazer renascer...  
e criar um Amor sem fim!

Por que todas as flores e as rosas  
vêm das sementes terrestres ou do além,  
e onde há semente há vida...  
Vida que vem do bem!

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus por dar-me força e erguer-me e reerguer-me nos momentos difíceis. A minha família, irmãs e amigos, pela paciência, confiança e força dadas.

Ao Prof. Dr. Maâmar El Robrini por disponibilizar o uso dos laboratórios, pela oportunidade dada, orientação da tese, paciência, confiança e amizade.

Ao Prof. Dr. Pedro Walfir Souza Filho, por disponibilizar o uso dos recursos do Laboratório de Aplicação de Imagens e Tecnologias (LAIT) Universidade Federal do Pará (UFPA), e pela contribuição direta ou indireta na realização da tese, admiração e amizade.

A Prof. Dr. George Satander Sá Freire, por disponibilizar o uso de recursos do Laboratório de Geologia Marinha e Aplicada (LGMA) da Universidade Federal do Ceará (UFC), no decorrer do curso, paciência, confiança e amizade.

Ao meu marido Flávio Rodrigo, pelo companheirismo, amizade, respeito, e força a mim dados durante o andamento da tese.

Ao Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica (PPGG) da UFPA, Prof. Dr. Marcondes Lima da Costa pela oportunidade dada a pesquisa.

Aos Prof(s). Dr(s). César Veríssimo, Marizete Dantas, Loreci Lohugeur e Paulo Thiers, pela disponibilidade dos laboratórios e instrumentos do Departamento de Geologia da UFC no decorrer da pesquisa e por estarem sempre disponíveis à ajudar.

Ao meu amigo Rodrigo Guimarães, pela amizade, respeito, e força a mim dada nos momentos difíceis.

A minha amiga Juliana Guerreiro, pela amizade, força, companhia e ajuda dadas sempre que precisei.

Aos meus colegas dos laboratórios: Marcelo, Leandro, Leilane do LRMM (Laboratório de Recursos Minerais Marinhos) da UFPA, Charles (*in memorian*); Sérgio Ricardo “o Serginho”, Lamarka, Ronaldo, Inácio, e Fernando do LGMA (Laboratório de Geologia Marinha e Aplicada) da UFC, pelo apoio e por terem me proporcionado uma convivência amigável.

Aos meus amigos Rodrigo Amaral, Maria Ester, João, Ester, Carmen, Heleninha, Thalita, Ana Paula, Jonas Junior, Thiago, Martinha, e Nirinha, pela companhia, admiração, apoio e amizade.

Agradeço em fim, a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização da minha dissertação, e aos que torceram pela minha vitória.

## RESUMO

A pesquisa enfoca a análise da morfologia e da dinâmica da linha de costa em médio (1958-2010) e curto período (2007) da planície costeira de Almofala (NW do Ceará, Nordeste do Brasil), incluindo as praias de Almofala, da Barreira e de Torrões influenciadas por altas temperaturas ( $>25^{\circ}\text{C}$ ), precipitação média de 1172,21 mm, velocidade média dos ventos de 5,5 m/s, regime de meso-marés (média de 1,48 m), e altura significativa das ondas de 0,56 m. Os objetivos focalizam: (1) a identificação das unidades e subunidades geomorfológicas (na escala 1:50000); e (2) a avaliação da dinâmica da linha de costa para o médio período (1958-2010) e o curto período (2007). A metodologia consistiu: (1) no mapeamento das unidades e subunidades geomorfológicas da PCA, utilizando o MDT e o mapa de declividade; (2) no monitoramento multitemporal da linha de costa para o médio período: com integração de fotografias aéreas e de imagens Quickbird (1958/2004 - 46anos); e interpretação visual de imagens Landsat (1977/2010 - 33anos); (3) na quantificação e mapeamento das zonas de erosão e acreção da linha de costa; (4) na variabilidade morfosedimentar para o curto período (2007) das praias de Almofala, da Barreira e de Torrões; e (5) zoneamento geoambiental com análise da vulnerabilidade e adequação de áreas pelas formas de uso e ocupação.

Na PCA, tem-se as seguintes unidades geomorfológicas e subunidades associadas: Planalto Costeiro (tabuleiros litorâneos com 8031957 m<sup>2</sup>, e plataforma de abrasão com 34654 m<sup>2</sup> de sedimentos da Formação Barreiras); e a Planície Costeira (planície aluvial com 944912 m<sup>2</sup>; a planície estuarina que inclui - planície de intermaré com 5782520 m<sup>2</sup>, planície lagunar com 1449466 m<sup>2</sup>, e delta com 66696 m<sup>2</sup>; e a planície arenosa - dunas fixas/eolianitos com 13879382 m<sup>2</sup>, dunas móveis com 1463971 m<sup>2</sup>, e praia com 837031 m<sup>2</sup>). Durante o período estudado (1977/2010 - 33 anos), a linha de costa de Almofala migrou várias vezes, tanto em direção ao continente como em direção ao oceano: na seção 3.1 - o recuo de 785 m, com taxa anual de 13,15 m/ano, retroprogando -1,3 Km<sup>2</sup>/46 anos (1958/2004), avançou 570m e progradou 888.045,47 m<sup>2</sup>/46 anos, com taxa anual de 6,3 m/ano; na seção 3.2 - o recuo foi de 668 m, a uma taxa de erosão foi 12,24 m/ano, retrogradando -0,98 km<sup>2</sup>/ 33anos (1977/2010), e avançou 394 m, com taxa de acreção de 8 m/ano, progradando 0,37 km<sup>2</sup>/33anos. As praias de Almofala, da Barreira e de Torrões se comportaram com RTR de onda dominante. O parâmetro  $\epsilon$  mostrou sistema barra e calha longitudinal nas praias de Almofala e de Torrões, com areias finas (44%), e estágio reflectivo na praia da Barreira, com areias médias (29%). O parâmetro  $\Omega$  teve estágios de terraço de maré baixa na praia de Almofala, e dissipativo nas praias da Barreira e de Torrões. Estas praias são semi-expostas, aos ventos e ondas, com

erosão nas praias da Barreira (-64,5 m<sup>3</sup>) e de Torrões (-72,1 m<sup>3</sup>), e acreção (62,83 m<sup>3</sup>) em Almofala. A praia de Torrões possui alta vulnerabilidade aos riscos ambientais (erosão), a praia da Barreira possui de média a alta vulnerabilidade e a praia de Almofala possui média vulnerabilidade a oeste e baixa vulnerabilidade a leste. O mapa geoambiental possibilitou identificar: com a maior área incluindo APP's, áreas de risco, áreas adequadas a ocupação, e áreas degradadas, por processos naturais (erosão costeira) e antrópicos, para contribuir com o planejamento ambiental e gerenciamento costeiro.

**Palavras-chaves:** Planície Costeira de Almofala, unidades e subunidades geomorfológicas, multitemporal (1958/2010), morfodinâmica praial (2007); zoneamento geoambiental.

## ABSTRACT

This study also a morphologic and dynamic analysis in mid-term (1958-2004) and low-term (2007) to Almofala coastal plain (NW of Ceara, Northeast Brazil), including Almofala, Barreira and Torroes Beachs conditioned for high temperatures ( $>25^{\circ}\text{C}$ ), media raining of 1172,21 mm, velocity winds of 5,5 m/s, mesotidal coast (media of 1,48 m), and height waves of 0,56 m. The objective also: (1) morphologic units and subunits identification (in scale 1:50000); (2) the evaluating shoreline changes by mid-term (1958-2010) and low-term (2007). The methodology consisted: (1) to compartment and subcompartment units, using the MDT and sloping map; (2) monitoring to coastal line in mid-term: with integration aerial photography's and Quickbird images 46 years (1958/2004) and Landsat images, 33 years (1977/2010); (3) quantification and mapping to erosion and accretion zones; (4) morpho-sediment variability analysis by low-term (2007) to Almofala, Barreira and Torroes beaches; and (5) geoambiental zoning with vulnerability analysis and adjusting areas by using and occupation.

In the PCA have this compartments and subdivisions: Plateaus (littoral "tabuleiros" with 8031957 m<sup>2</sup> and abrasion platform - 34654 m<sup>2</sup>; Coastal Plain (alluvial plain with 944912 m<sup>2</sup>; estuarine plain - lagune plain with 1449466 m<sup>2</sup>, ebb-tidal plain 66696 m<sup>2</sup>, tidal channels with 847036 m<sup>2</sup> and delta with 66696 m<sup>2</sup>; and sandy plain (coastal sandy dunes with 15343353 m<sup>2</sup> and beaches with 837031 m<sup>2</sup>). During period studied (1977/2010 - 33 years) the Almofala shoreline migrated so much, as continent direction as ocean direction: (1) section 3.1 - shoreline retreat of 785 m, with annual erosion rate of 13,15 m/years, retrograding -1,3 Km<sup>2</sup>/46 years (1958/2004), and addition of 570 m , prograding 888.045,47 m<sup>2</sup>/46 year, with annual rate of 6,3 m/year; (2) section 3.2 - the shoreline retreated 668 m, by erosion rate 12,24 m/year, retrograding -0,98 km<sup>2</sup>/ 33years (1977/2010), with addition 394 m, and accretion rate of 8m/year, prograding 0,37 km<sup>2</sup>/33years. The Almofala, Barreira and Torroes beaches behaved the beaches itself with RTR dominate wave. The parameter  $\epsilon$  showed longshore bar and runnel to Almofala and Torroes beaches, with fine grain sizes (44%), and reflective to Barreira beach, with median grain sizes (29%). The parameter  $\Omega$  has stages low-tide terrace intermediate to Almofala beach and dissipative to Barreira and Torroes beaches. This beaches is semi-exposed by winds and waves, with erosion to Barreira (-64,5 m<sup>3</sup>) and Torroes (-72,1 m<sup>3</sup>) beaches, and acretion (62,83 m<sup>3</sup>) to Almofala beach (2007). The Torrões beach have high vulnerability by environmental risks (erosion), the Barreira beach have media as high vulnerability and the Almofala beach have media vulnerability to west and low

vulnerability to east. The geoambiental map include: major APP's areas, risky areas, appropriate occupation areas; and degraded areas for natural process (coastal erosion) and anthropic process to contribute with environmental planning and coastal management.

**Key-words:** Almofala Coastal Plain; geomorphological compartments and subdivisions; remote sensing; multitemporal (1958/2010); beach morphodynamic; geoambiental zoning.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

### Lista de Figuras

#### CAPÍTULO 1

- Figura 1 - Mapa de localização da Planície Costeira de Almofala, do levantamento topográfico e das coletas de sedimentos. \_\_\_\_\_ 4
- Figura 2 - Posicionamento do primeiro ponto de referência Marco da Estação 92397 de Itarema (a), e DGPS Prymark2 Ashtech (b). \_\_\_\_\_ 9
- Figura 3 - Estação meteorológica eletrônica Davis Instruments (a). Anemômetro (b). \_\_\_\_\_ 10
- Figura 4 - Mapa Geológico da planície costeira de Almofala. \_\_\_\_\_ 17
- Figura 5 - a) Afloramentos da Formação Barreiras na estrada de Itarema (a,b); c) níveis conglomeráticos. \_\_\_\_\_ 18
- Figura 6 - Afloramento da Formação Barreiras na praia de Almofala (a e b); em destaque falha no sentido NW-SE (c). \_\_\_\_\_ 19
- Figura 7 - Laguna Salgada na planície costeira de Itarema originada por processos de fechamento de barras arenosas. \_\_\_\_\_ 19
- Figura 8 - Dunas fixas por vegetação na margem esquerda do canal de maré (c), e eolianitos na margem direita do canal (c), morfologia de dunas preservada por cimentação do carbonato de cálcio (a) (b) (c) e (d). \_\_\_\_\_ 20
- Figura 9 - Estuário do rio Aracatimirim desagüando na praia de Torrões. \_\_\_\_\_ 21
- Figura 10 - Canal de maré que tem ligação com a Laguna Salgada, montante (a), e juzante (b), na praia da Barra. \_\_\_\_\_ 21
- Figura 11 - Córrego do Lamarão (a); Córrego Grande (b); e Córrego do Paná (c). \_\_\_\_\_ 22
- Figura 12 - Mapa Hidrográfico da planície costeira de Almofala e adjacências. \_\_\_\_\_ 22
- Figura 13 - Neossolos Quartzarênicos nas dunas da praia de Almofala (a), e nas dunas da praia de Torrões (b). \_\_\_\_\_ 23
- Figura 14 - Perfil 1 Neossolo Quartzarênico (a) e Perfil 2 Neossolo Quartzarênico (b), nos tabuleiros litorâneos da PCA. \_\_\_\_\_ 24
- Figura 15 - Solos do tipo Gleissolos na Laguna Salgada. \_\_\_\_\_ 25
- Figura 16 - Perfil 3 Planossolo Solódico às margens do rio Aracatimirim. \_\_\_\_\_ 25
- Figura 17 - Planossolos às margens do Córrego Lamarão. \_\_\_\_\_ 26

Figura 18 - Vegetação de praia e de dunas na praia de Almofala. _____	28
Figura 19 - Manguezal na praia da Barreira. _____	29
Figura 20 - Totais pluviométricos históricos no Município de Itarema (1977 - 2010) (Fonte: FUNCEME 2010). _____	30
Figura 21 - Média mensal histórica da precipitação do Município de Itarema (1977 - 2010) (Fonte: FUNCEME 2010). _____	31
Figura 22 - Anomalia TSM de 1982 à 2000 no Pacífico Tropical (Fonte: CPTEC 2008). ____	31
Figura 23 - Anomalia TSM do Pacífico Tropical (2002 à 2010) (Fonte: FUNCEME 2010). _____	32
Figura 24 - Mapa de direção dos ventos na praia de Almofala medidos em: 19/03/2007 (quadra chuvosa), 14/07/2007 (quadra intermediária) e 24/11/2007 (quadra seca). _____	33
Figura 25 - Velocidade sazonal dos ventos na praia de Almofala medidos em: 19/03/2007 (quadra chuvosa), 14/07/2007 (quadra intermediária) e 24/11/2007 (quadra seca). _____	34
Figura 26 - Velocidade sazonal dos ventos na praia da Barreira medidos em: 19/03/2007 (quadra chuvosa), 14/07/2007 (quadra intermediária) e 24/11/2007 (quadra seca). _____	34
Figura 27 - Velocidade sazonal dos ventos na praia de Torrões medidos em: 19/03/2007 (quadra chuvosa), 14/07/2007 (quadra intermediária) e 24/11/2007 (quadra seca). _____	34
Figura 28 - Mapa de circulação das correntes da Planície Costeira de Almofala (Fonte: DHN 2006). _____	37
Figura 29 - Ondas do tipo deslizantes na praia da Barra. _____	38
Figura 30 - Relação entre perfil vertical de velocidade do vento e concentração de sedimentos de acordo com a altura, na praia de Almofala. _____	40
Figura 31 - Relação da precipitação e transporte eólico na PCA no ano de 2007. _____	41
Figura 32 - Curva das oscilações do nível do mar para a costa leste brasileira (Suguio 1985). _____	42
Figura 33 - Mapa de Isóbatas da plataforma continental interna da PCA e adjacências (Fonte: Silva Filho 2004). _____	44
Figura 34 - Mapa Faciológico da Plataforma Continental Interna da PCA e adjacências. (Fonte: adaptado de Freire 1985, Freire & Cavalcanti 1998, Silva Filho, 2004). _____	45
Figura 35 - Amostras de rodolitos <i>Lithothamnion</i> na praia da Barreira (a) (b), (c) e (d). ____	45

## CAPÍTULO 2

Figura 1 - Mapa de localização da Planície Costeira de Almofala. _____	49
Figura 2 - Modelo Digital de Terreno integrado a Batimetria e topografia da Planície Costeira de Almofala. _____	53
Figura 3 - Modelo Digital de Elevação da Planície Costeira de Almofala. _____	53
Figura 4 - Mapa de Declividade da Planície Costeira de Almofala. _____	54
Figura 5 - Mapa Geomorfológico da Planície Costeira de Almofala. _____	56
Figura 6 - Afloramento da Formação Barreiras, Planalto Costeiro na estrada de Itarema, com superfície plana (a); Plataforma de abrasão da Formação Barreiras (praia de Almofala) (b). _____	57
Figura 7 - Planície Estuarina do rio Aracatimirim (a); Paleo-Mangue na praia de Almofala (b); e Planície Estuarina na praia da Barreira (c). _____	59
Figura 8 - As setas amarelas indicam as dunas longitudinais alongando-se para a parte interna da praia de Almofala. _____	60
Figura 9 - Eolianitos na praia de Torrões (a); eolianitos na praia de Almofala (b); eolianitos em contato com a lagoa abandonada na praia de Almofala (c); detalhe de eolianito na praia de Almofala formando escarpas de praia (d). _____	61
Figura 10 - Eolianitos na parte interna da PCA (a) e (c) com morfologia piramidal, e escarpa de eolianito (b). _____	62
Figura 11 - Perfil morfológico do sistema praia-duna superficial da Praia de Torrões, próximo ao Projeto TAMAR. _____	62
Figura 12. Dunas frontais na praia de Almofala, parte leste (a) e parte oeste (b). _____	63
Figura 13 - Morfologia da praia de Almofala e das dunas frontais. _____	63
Figura 14 - Zona de infra-maré (ou estirâncio) com linhas de maré, e escarpa na Praia de Almofala foto (a); Estirâncio com sistema de barra e calha na praia da Barreira (b); Zona de supra-maré, e de infra-maré com sistema de barra e calha na praia de Torrões (c). _____	65
Figura 15 - Praia de Almofala, com destaque para a zona de inter-maré (a) e (b); linhas de marés expostas na zona de estirâncio na praia de Almofala (b) e na praia de Torrões (c). _____	65
Figura 16 - Baixo gradiente topográfico na zona de estirâncio, e estágio dissipativo da praia de Almofala. _____	66
Figura 17 - Perfis nas praias da Barreira (P1, P2), Almofala (P3) e Torrões (P4). _____	67

## CAPÍTULO 3

### Seção 3.1

- Figura 1 - Mapa de localização da Planície Costeira de Almofala. \_\_\_\_\_ 78
- Figura 2 - Mosaico das imagens Quickbird (2004) na PCA. \_\_\_\_\_ 79
- Figura 3 - Linha de costa (2004) e plataforma de abrasão da praia de Almofala (seta), em zoom no focus do aplicativo PCI 8.0. \_\_\_\_\_ 80
- Figura 4 - Mosaico de fotografias aéreas (1958) na PCA, com a delimitação da barra arenosa de Torrões, e a linha de costa de 1988 (em azul). \_\_\_\_\_ 82
- Figura 5 - Mosaico de fotografias aéreas na PCA (1988) com a delimitação da linha de costa (em azul), e a erosão da barra arenosa de Torrões (1958/1988) (em lilás). \_\_\_\_\_ 83
- Figura 6 - Mapa de variação da linha de costa na Planície costeira de Almofala (1958 - 2004).  
\_\_\_\_\_ 84
- Figura 7 - Mapa de retrogradação e progradação da linha de costa no setor 1: de 1958 à 1988 (a); e de 1988 à 2004 (b). \_\_\_\_\_ 85
- Figura 8 - Mapa de retrogradação e progradação da linha de costa no setor 2 (1958 à 1988).  
\_\_\_\_\_ 86
- Figura 9 - Mapa de retrogradação e progradação da linha de costa no setor 2 (1988 à 2004).  
\_\_\_\_\_ 86
- Figura 10 - Paleo-Mangue e sedimentos estuarinos soterrados por migração de cordão litorâneo na praia de Almofala. \_\_\_\_\_ 88
- Figura 11 - Anomalia TSM (1982 à 2000), no Pacífico Tropical (Fonte: CPTEC, 2008). \_\_ 89
- Figura 12 - Totais pluviométricos históricos no município de Itarema, 1977 à 2004 (Fonte: FUNCEME, 2006). \_\_\_\_\_ 89
- Figura 13 - Figura 13. Precipitação histórica mensal no município de Itarema, 1977 à 2004 (Fonte: FUNCEME, 2006). \_\_\_\_\_ 90

### Seção 3.2

- Figura 1 - Mapa de localização da Planície Costeira de Almofala (a); com mudanças do cordão litorâneo nas imagens Landsat de 1988 (a); 2003 (b) e 2010 (c). \_\_\_\_\_ 99
- Figura 2 - Variação da linha de Maré Alta (LMA) da PCA para o período de 1977-2010. \_104

Figura 3 - Mapas de progradação e retrogradação no setor 1: 1977-1982 (a); 1983-1988 (b); 1988-2003 (c); 2003-2010 (d). \_\_\_\_\_ 105

Figura 4 - Mapas de progradação e retrogradação no setor 2: 1977-1982 (a); 1983-1988 (b); 1988-2003 (c); 2003-2010 (d). \_\_\_\_\_ 106

Figura 5 - Precipitação histórica (1977/2010) do município de Itarema relacionada com a classificação da intensidade das anomalias El niño e La niña. \_\_\_\_\_ 108

Figura 6. Anomalia TSM no Pacífico Tropical de 2002 à 2010 (Fonte: FUNCEME, 2010. \_\_\_\_\_ 109

## **CAPÍTULO 4**

Figura 1 - Mapa de localização da Planície Costeira de Almofala. \_\_\_\_\_ 116

Figura 2 - Perfis topográficos na Praia de Almofala, e variação da morfologia praial nas quadras chuvosa (março), intermediária (julho) e seca (novembro). \_\_\_\_\_ 123

Figura 3 - Variação da praia de Almofala (PA2) na quadra chuvosa (a); alto gradiente topográfico na zona de estirâncio (quadra seca), com paleo-mangue (b). \_\_\_\_\_ 124

Figura 4 - Parte leste da Praia de Almofala (PA3), novembro (a); e (PA4) em julho (b). \_\_\_\_ 124

Figura 5 - Praia de Almofala (PA5), na quadra chuvosa (a); e seu gradiente topográfico no início da zona de infra-maré, na quadra intermediária (b). \_\_\_\_\_ 125

Figura 6 - Perfis topográficos da Praia da Barreira, e a variação da morfologia praial nas quadras chuvosa (março), intermediária (julho) e seca (novembro). \_\_\_\_\_ 126

Figura 7 - Praia da Barreira (PB1). \_\_\_\_\_ 127

Figura 8 - Ponta do cordão litorâneo da praia da Barreira (PB5). \_\_\_\_\_ 127

Figura 9 - Praia de Torrões (PT2) na transição da zona de supramaré, para a zona de intermaré, com sistema de barras e calhas. \_\_\_\_\_ 128

Figura 10 - Perfis topográficos da Praia de Torrões, e a variação da morfologia praial nas quadras chuvosa (março), intermediária (julho) e seca (novembro). \_\_\_\_\_ 129

Figura 11 - Praia de Torrões (PT3) próximo a foz do Rio Aracatimirim, com sistema de barra e calha. \_\_\_\_\_ 130

Figura 12 - Distribuição horizontal de sedimentos na praia de Almofala durante as quadras chuvosa, seca e intermediária. \_\_\_\_\_ 133

Figura 13 - Distribuição horizontal de sedimentos na praia da Barreira durante as quadras chuvosa, seca e intermediária. \_\_\_\_\_ 134

Figura 14 - Distribuição horizontal de sedimentos na praia de Torrões durante as quadras chuvosa, seca e intermediária. \_\_\_\_\_135

## **CAPÍTULO 5**

Figura 1 - Mapa de localização da Planície Costeira de Almofala. \_\_\_\_\_146

Figura 2 - Tanques de carcinocultura no canal estuarino da praia da Barreira, Itarema. \_\_\_\_149

Figura 3 - Distribuição da morfologia da PCA com uso e ocupação. \_\_\_\_\_151

Figura 4 - Dunas que cobriram a Igreja de Almofala no século passado. \_\_\_\_\_152

Figura 5 - Mapa Geomorfológico com vulnerabilidade da linha de costa. \_\_\_\_\_154

Figura 6 - Inundação da maré de sizígia (março) e efeito da erosão na vila de Torrões (a) e (b); recuo da linha de costa na praia da Barreira (c); destruição da obra de contenção na praia da Barreira (2007) nos meses de março (d), e novembro (e). \_\_\_\_\_155

Figura 7 - Mapa Geoambiental da Planície Costeira de Almofala. \_\_\_\_\_157

## Lista de Tabelas

### CAPÍTULO 1

Tabela 1 - Textura dos grãos dos perfis de solos na PCA (Lima *et al.*, 2000). \_\_\_\_\_23

Tabela 2 - Valores de período (T) e altura (Hb) das ondas nas praias da Planície Costeira de Almofala (2007). \_\_\_\_\_39

### CAPÍTULO 2

Tabela 1 - Unidades e Subunidades geomorfológicas da PCA. \_\_\_\_\_55

### CAPÍTULO 3

#### Seção 3.1

Tabela 1 - Progradação e Retrogradação da linha de costa da PCA (1958-2004). \_\_\_\_\_84

#### Seção 3.2

Tabela 1 - Características dos produtos de sensores remoto multitemporais. \_\_\_\_\_101

Tabela 2 - Progradação e Retrogradação da linha de costa da PCA (1977-2010). \_\_\_\_\_103

### CAPÍTULO 4

Tabela 1 - Gradientes topográficos nas praias de Almofala (PA), da Barreira (PB) e de Torrões (PT). \_\_\_\_\_121

## SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	iv
AGRADECIMENTOS.....	vi
RESUMO.....	vii
ABSTRACT.....	ix
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 APRESENTAÇÃO E OBJETIVOS.....	1
1.2 LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO GEOGRÁFICA DA ÁREA DE ESTUDO.....	3
1.3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	5
1.4 METODOLOGIA.....	7
1.4.1 <b>Trabalhos de Campo</b> .....	8
1.4.1.1 Levantamentos topográficos.....	8
1.4.1.2 Amostragem de sedimentos.....	9
1.4.1.3 Medição dos parâmetros meteorológicos.....	9
1.4.1.4 Medição dos Parâmetros Oceanográficos.....	10
1.4.1.5 Transporte litorâneo de sedimentos “in situ”.....	11
1.4.2 <b>Procedimentos Laboratoriais</b> .....	11
1.4.2.1 Sensoriamento Remoto.....	11
1.4.2.2 Análise de Sedimentos Arenosos.....	12
1.4.2.3 Procedimentos laboratoriais do transporte litorâneo de sedimentos.....	13
1.4.3 <b>Análise Estatística Multivariada</b> .....	13
1.5 ASPECTOS FÍSICO-AMBIENTAIS NA PLANÍCIE COSTEIRA DE ALMOFALA.....	14
1.5.1 <b>Aspectos Geológicos na Planície Costeira de Almofala</b> .....	14
1.5.1.1 Considerações sobre a Evolução Neotectônica.....	15
1.5.1.2 Caracterização e Compartimentação Geológica na PCA.....	15
1.5.1.2.1 <i>Pré-Cambriano</i> .....	16
1.5.1.2.2 <i>Neógeno/Quaternário (Formação Barreiras)</i> .....	18
1.5.1.2.3 <i>Unidades Quaternárias</i> .....	19
1.5.2 <b>Aspectos Hidrográficos</b> .....	20
1.5.3 <b>Solos</b> .....	22
1.5.3.1 Neossolos.....	23
1.5.3.1.1 <i>Neossolos Quartzarênico 1 (Areias Quartzosas Marinhas Distróficas)</i> .....	23
1.5.3.1.2 <i>Neossolos Quartzarênico 2 (Areias Quartzosas Distróficas)</i> .....	24
1.5.3.2 Gleissolos (Solonchak Sódico).....	24
1.5.3.3 Planossolos.....	25
1.5.3.3.1 <i>Planossolos 1 (Planossolo Solódico)</i> .....	25
1.5.3.3.2 <i>Planossolo 2 (Solonetz Solodizado)</i> .....	26
1.5.5 <b>Vegetação na Planície Costeira de Almofala</b> .....	26
1.5.5.1 Mata Ciliar.....	27
1.5.5.2 Vegetação Costeira.....	27
1.5.6 <b>Condições Climáticas e Meteorológicas na Planície Costeira de Almofala</b> .....	29
1.5.6.1 Regime Pluviométrico e Térmico na Planície Costeira de Almofala.....	29
1.5.6.2 Atuação de Eventos Extremos.....	30
1.5.6.3 Regime sazonal dos Ventos na PCA.....	32

<b>1.5.7 Aspectos Oceanográficos, Meteorológicos e Hidrodinâmicos na Planície Costeira de Almofala</b> .....	35
1.5.7.1 Marés.....	35
1.5.7.2 Correntes.....	36
1.5.7.2.1 <i>Corrente longitudinal</i> .....	36
1.5.7.2.2 <i>Corrente de maré</i> .....	37
1.5.7.3 Ondas.....	38
1.5.7.4 Transporte de sedimentos na planície costeira de Almofala.....	39
1.5.7.4.1 <i>Transporte litorâneo de sedimentos</i> .....	39
1.5.7.4.2 <i>Transporte eólico de sedimentos</i> .....	40
Varição vertical do transporte de sedimentos.....	40
Taxa de transporte de sedimentos na planície costeira de Almofala.....	41
<b>1.5.8 Variação do Nível do Mar</b> .....	41
<b>1.5.9 Fisiografia da plataforma continental interna na PCA</b> .....	42
<b>2 COMPARTIMENTAÇÃO MORFOLÓGICA DA PLANÍCIE COSTEIRA DE ALMOFALA (NW DO CEARÁ - NORDESTE DO BRASIL)</b> .....	<b>46</b>

> Situação do Artigo: *artigo submetido na Revista Brasileira de Geociências em 12 de abril de 2011*

<b>2.1 INTRODUÇÃO</b> .....	47
<b>2.1.1 Localização e caracterização geográfica na Planície Costeira de Almofala</b> .....	48
<b>2.2 METODOLOGIA</b> .....	50
<b>2.2.1 Amostragem dos dados topográficos</b> .....	50
<b>2.2.2 Procedimentos laboratoriais</b> .....	51
2.2.2.1 Modelagem Digital de Terreno (MDT) e geração de mapas temáticos.....	51
2.2.2.2 Mapeamento geomorfológico na Planície Costeira de Almofala.....	51
<b>2.3 ANÁLISE DO MODELO DIGITAL DE TERRENO (MDT) NA PCA</b> .....	52
<b>2.4 COMPARTIMENTAÇÃO GEOMORFOLÓGICA NA PCA</b> .....	54
<b>2.4.1 Planalto costeiro</b> .....	56
<b>2.4.2 Planície Costeira</b> .....	57
2.4.2.1 Planície Aluvial.....	58
2.4.2.2 Planície estuarina.....	58
2.4.2.2.1 <i>Planície flúvio-lagunar</i> .....	58
2.4.2.2.2 <i>Planície de inter-maré</i> .....	59
2.4.2.2.3 <i>Delta</i> .....	59
2.4.2.3 Planície Arenosa.....	59
2.4.2.3.1 <i>Cordões Arenosos de dunas</i> .....	60
2.4.2.3.2 <i>Cordões arenosos de Praia</i> .....	64
<b>2.5 DISCUSSÕES</b> .....	68
<b>2.6 CONCLUSÕES</b> .....	70
<b>2.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	70

<b>3 MUDANÇAS MORFOLÓGICAS NA PLANÍCIE COSTEIRA DE ALMOFALA EM MÉDIO PERÍODO UTILIZANDO TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO</b> 74	
<b>3.1 ANÁLISE MULTITEMPORAL DA LINHA DE COSTA EM MÉDIO PERÍODO (1958-2004) NA PLANÍCIE COSTEIRA DE ALMOFALA, ITAREMA, CEARÁ, BRASIL, UTILIZANDO IMAGENS DE SATÉLITES E FOTOGRAFIAS AÉREAS</b> .....	74

> Situação do Artigo: *artigo submetido na Revista Quaternary and Environmental Geosciences em 15 de maio de 2010*

<b>3.1.1 Introdução</b> .....	75
3.1.1.1 Localização e caracterização geográfica na PCA .....	77
<b>3.1.2 Metodologia</b> .....	78
3.1.2.1 Sensoriamento Remoto .....	79
3.1.2.2.1 <i>Imagens Quickbird</i> .....	80
3.1.2.2.2 <i>Fotografias Aéreas</i> .....	81
3.1.2.2.3 <i>Cálculo de erro</i> .....	82
<b>3.1.3 Variação morfológica da linha de costa na PCA em médio período (1958-2004)</b> .....	83
<b>3.1.4 Impactos das mudanças morfológicas da linha de costa na PCA</b> .....	87
<b>3.1.5 Discussões</b> .....	90
<b>3.1.6 Conclusões</b> .....	92
<b>3.1.7 Referências bibliográficas</b> .....	92
<b>3.2 VARIABILIDADE MULTITEMPORAL DA LINHA DE COSTA EM MÉDIO PERÍODO (1977-2010) UTILIZANDO IMAGENS DO SATÉLITE LANDSAT NA PLANÍCIE COSTEIRA DE ALMOFALA, ITAREMA, CEARÁ, BRASIL</b> .....	96

> Situação do Artigo: *artigo submetido na Revista Brasileira de Geociências em 24 de março de 2011*

<b>3.2.1 Introdução</b> .....	97
3.2.1.1 Localização e caracterização geográfica na PCA .....	98
<b>3.2.2 Metodologia</b> .....	100
3.2.2.1 Coleta de pontos topográficos.....	100
3.2.2.2 Sensoriamento Remoto para análise da linha de costa na PCA.....	100
3.2.2.2.1 <i>Imagens Landsat e cálculo de erro da análise multitemporal</i> .....	101
<b>3.2.3 Variação da linha de maré alta (LMA) na PCA em médio período (1977-2010)</b> .....	103
<b>3.2.4 Impactos das mudanças morfológicas da linha de costa na PCA</b> .....	106
<b>3.2.5 Discussões</b> .....	109
<b>3.2.6 Conclusões</b> .....	110
<b>3.2.7 Referências bibliográficas</b> .....	110

<b>4 MORFODINÂMICA DE PRAIAS OCEÂNICAS DOMINADAS POR MESOMARÉS NA PLANÍCIE COSTEIRA DE ALMOFALA, NW DO CEARÁ (BRASIL)</b> .....	114
---	-----

> Situação do Artigo: *minuta concluída*

<b>4.1 INTRODUÇÃO</b> .....	115
<b>4.2 METODOLOGIA</b> .....	117
4.2.1 Levantamento de perfis praias e coleta de amostras .....	117
4.2.2 Coleta de sedimentos praias .....	118
4.2.3 Medição dos parâmetros oceanográficos .....	118
4.2.4 Processamento dos perfis praias.....	118
4.2.5 Análise de sedimentos arenosos .....	118
4.2.6 Parâmetros morfodinâmicos .....	119
<b>4.3 VARIAÇÃO MORFOLÓGICA E MODELO DAS PRAIAS NA PLANÍCIE COSTEIRA DE ALMOFALA</b> .....	120
4.3.1 Praia de Almofoala.....	123
4.3.2 Praia da Barreira .....	125
4.3.3 Praia de Torrões .....	127

4.4 VARIABILIDADE MORFOLÓGICA E GRANULOMÉTRICA SAZONAL DAS PRAIAS NA PCA.....	130
4.4.1 Praia de Almofala.....	130
4.4.2 Praia da Barreira.....	131
4.4.3 Praia de Torrões.....	132
4.5 VARIABILIDADE DO VOLUME SEDIMENTAR SAZONAL DAS PRAIAS NA PCA.....	136
4.6 DISCUSSÕES.....	137
4.7 CONCLUSÕES.....	139
4.8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	139
<b>5 ZONEAMENTO GEOAMBIENTAL COMO SUBSÍDEO AO GERENCIAMENTO NA PLANÍCIE COSTEIRA DE ALMOFALA, NW DO CEARÁ (BRASIL).....</b>	<b>143</b>
> Situação do Artigo: <i>minuta concluída</i>	
5.1 INTRODUÇÃO.....	144
5.1.1 Localização e caracterização geográfica na área de estudo.....	145
5.2 METODOLOGIA.....	147
5.2.1 Taxa de variação da linha de costa na PCA.....	147
5.2.2 Mapeamento das Unidades Geoambientais.....	148
5.2 USO E OCUPAÇÃO E ASPECTOS SÓCIO-AMBIENTAIS NA PCA.....	148
5.2.1 Carcinocultura.....	149
5.2.2 Artesanato.....	149
5.2.3 Pesca.....	150
5.2.4 Turismo.....	150
5.2.5 Degradação ambiental na PCA.....	150
5.3 MORFOLOGIA, EROÇÃO E ANÁLISE DE RISCOS AMBIENTAIS NA PLANÍCIE COSTEIRA DE ALMOFALA.....	152
5.3.1 Caracterização morfológica na Planície Costeira de Almofala.....	152
5.3.2 Erosão costeira e análise dos riscos ambientais na Planície Costeira de Almofala.....	153
5.4 ZONEAMENTO GEOAMBIENTAL NA PLANÍCIE COSTEIRA DE ALMOFALA.....	155
5.4.1 Áreas de preservação permanente (APP's).....	156
5.4.2 Áreas adequadas à ocupação.....	156
5.4.3 Áreas de risco à ocupação.....	156
5.4.4. Áreas de degradação ambiental.....	157
5.5. PROPOSTAS DE ORDENAMENTO TERRITORIAL E MEDIDAS MITIGADORAS.....	158
5.5.1 Ações Mitigadoras.....	158
5.6 DISCUSSÕES E CONCLUSÕES.....	159
5.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	160
<b>6 CONCLUSÕES.....</b>	<b>164</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>168</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 APRESENTAÇÃO E OBJETIVOS

Esse trabalho revela as unidades morfológicas e a dinâmica costeira (médio período - 1958/2010) e (curto período - 2007) da planície costeira de Almofala (PCA), município de Itarema, localizado no NW do estado do Ceará, utilizando técnicas de sensoriamento remoto (interpretação visual de imagens e processamento digital de imagens - PDI's), e integração de dados (morfológicos, mudanças da linha de costa, e morfodinâmicos) em Sistemas de Informações Geográficas (SIG's). Além de propor um zoneamento geoambiental da área.

Desde a década de 70 pesquisas sobre a morfologia e dinâmica costeira são realizadas no Ceará: Estudo Geomorfológico-sedimentológico do litoral de Beberibe (Morais 1975); Estudo hidrológico e sedimentológico do estuário do rio Pacoti (Freire 1989); Processos e impactos ambientais em zonas costeiras (Morais 1996); Morfodinâmica da praia do Iguape (Paula & Morais 2001); Morfodinâmica e relação com os riscos de banho de mar na Praia do Futuro (Albuquerque & Pinheiro 2005); Influência dos processos estuarinos na morfodinâmica e vulnerabilidade a erosão da Prainha de Aquiraz (Pinheiro *et al.* 2006); Morfodinâmica da Praia do Futuro (Albuquerque *et al.* 2009); Processos costeiros e balanço sedimentar na costa de Fortaleza (Maia 1998); Variação da linha de costa das praias do Mucuripe (Pinheiro & Morais 2007); Uso de técnicas de geoprocessamento na evolução da linha de costa (Farias & Maia 2010), etc.

O Programa nacional de gerenciamento costeiro (PNGC) consolidado pelo Governo Federal (Lei 7661 de 1988) (SEMACE, 2010) vem contribuindo com estudos e ações para o conhecimento e o planejamento ambiental da Planície Costeira do Ceará, com apoio de programas como o Gerenciamento costeiro do estado (GERCO), conduzidas através dos seus instrumentos de gestão.

Não há estudos sobre a geomorfologia e dinâmica costeira da PCA, considerada como uma área de alto potencial turístico. Os trabalhos de campo revelam que parte da PCA encontra-se impactada por atividades antrópicas recentes como fazendas de camarão, etc. Estas questões ambientais têm levado a fazer este estudo.

Os processos naturais costeiros (erosão e deposição de sedimentos) e processos antrópicos (ocupação humana, e fazenda de camarões) geram diversas transformações na morfologia costeira (Aguiar 2005), em várias escalas temporais e espaciais, como crescimento ou diminuição de áreas de manguezais, desenvolvimento de cordões e bancos arenosos, recuo de falésias, migração de desembocaduras de canais de maré, variabilidade do perfil praiial, etc.

(Souza Filho 2000, Sales 2002, e Raichich 2007), controladas pela ação interativa dos processos de marés, ondas e ventos (Yoshikawa & Nemoto 2010).

A dinâmica costeira pode ser afetada por eventos extremos, tais como o El Niño e La Niña (Souza Filho 2000), tempestades e ressacas que interferem nos sistemas oceanográficos e hidrodinâmicos (Klein *et al.* 2009), por: aumento de temperaturas do ar e do mar, mudanças na circulação do ar, correntes marinhas, e na precipitação, afetando o aporte de sedimentos por rios e deriva litorânea, melhor entendidos através de dados de sensores remotos (Callaghan *et al.* 2009).

Assim, é fundamental a integração de dados e imagens de sensores remotos em SIG's, nos trabalhos de morfologia e mudanças costeiras (França 2003), e de evolução da linha de costa (Chen *et al.* 2005), auxiliando na quantificação dos processos de erosão e acreção (Callaghan *et al.* 2009), aliados aos estudos da interação de atividades humanas na zona costeira (Barale & Folving 1996).

Os objetivos deste trabalho são: (1) realizar a compartimentação geomorfológica da PCA; (2) analisar a dinâmica costeira em médio período: com integração de fotografias aéreas e de imagens Quickbird (46 anos - 1958 à 2004), e de imagens Landsat (33 anos - 1977 - 2010); (3) identificar e quantificar as zonas de erosão e deposição (mapas de médio período de retrogradação e progradação); (4) analisar a variabilidade morfosedimentar das praias oceânicas de Almofala, da Barreira e de Torrões para um curto período (2007); (5) realizar zoneamento geoambiental com adequação de áreas pelas formas de uso e ocupação.

Esse trabalho está organizado da seguinte forma:

A primeira parte - é a introdução com os objetivos, a apresentação, a localização da PCA, o referencial teórico; caracterização físico-ambiental da área, incluindo os aspectos geológicos, condições climáticas, hidrográficas e hidrodinâmicas, a caracterização pedológica e vegetacional.

A segunda parte - refere-se ao estudo da compartimentação geomorfológica da PCA, através da integração de sensoriamento remoto, modelo digital de terreno (MDT), mapa de declividade e curvas de nível, análise de sedimentos superficiais, e confecção de perfis topográficos das praias.

A terceira parte - contém a análise multi-temporal da PCA em médio período de 52 anos (1958 à 2010): seção (1) com base na integração de fotografias aéreas e imagens Quickbird, num período de 46 anos (1958 à 2004); e seção (2) com uso de imagens orbitais LANDSAT (33 anos - 1977 à 2010), em SIG's e PDI's.

A quarta parte - apresenta a variabilidade morfosedimentar e as mudanças costeiras de curto período (2007) das praias de Almofala, da Barreira e de Torrões, com base no levantamento sazonal de perfís topográficos e granulometria dos sedimentos praias.

A quinta parte - é uma proposta das zonas geoambientais da PCA de adequação ao uso, com análise da vulnerabilidade aos riscos ambientais e o mapeamento das unidades, gerando subsídios ao planejamento e gestão ambiental da área, por meio de geotecnologias.

A sexta parte - discussão e conclusão, buscando relacionar os resultados dos diferentes capítulos, para uma síntese dos processos e formas decorrentes da caracterização geológica e geomorfológica da área, das mudanças costeiras de médio e curto período da PCA, e do zoneamento geoambiental.

A sétima parte - contém as referências bibliográficas utilizadas na presente tese.

## 1.2 LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO GEOGRÁFICA DA ÁREA DE ESTUDO

A PCA (Figura 1) inclui as praias de Almofala, da Barreira e de Torrões, com cerca de 8km, dos 32 km de costa do município de Itarema, localizada na costa oeste do estado do Ceará (Nordeste, Brasil), enquadra-se nas coordenadas UTM: X1: 403000 E, 9673000N, X2: 412000E, 9679000N. Limita-se ao sul com o distrito de Carvoeiro, ao norte e nordeste com o Oceano Atlântico, sudeste com o distrito de Camboré, e a oeste com a praia da Barra, distando cerca de 185 Km de Fortaleza. O acesso se dá partindo da capital, à noroeste, pela CE – 085.

A PCA possui um empilhamento estratigráfico, com o afloramento de duas unidades: a Formação Barreiras (Mioceno/Plioceno); e os Depósitos Quaternários (Holoceno). A área está assentada numa margem passiva (Costa *et al.* 1990, Beltrami *et al.* 1994, CPRM 2003, Silva Filho 2004), com uma falha inferida (NE-SW) no continente, e falhas normais (E-W) na plataforma continental interna adjacente.

Na PCA, tem-se o seguinte arranjo geomorfológico: Planalto Costeiro, também conhecido como Tabuleiro Pré-litorâneo, caracterizado por feições tabulares recortadas por interflúvios; e a Planície Costeira que engloba as planícies aluviais, estuarinas e arenosas (Souza 1989, 1994, Sales 2002).

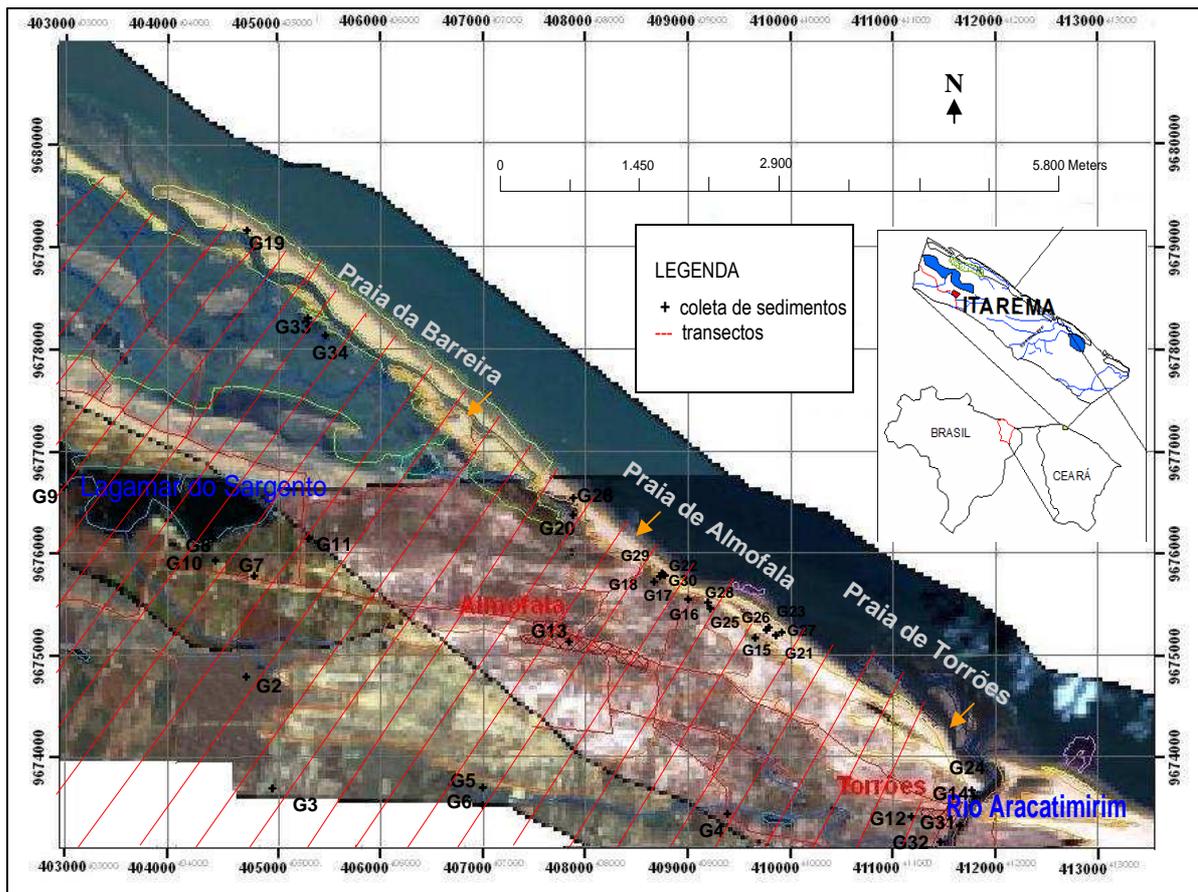


Figura 01. Mapa de localização da Planície Costeira de Almofala, do levantamento topográfico e das coletas de sedimentos.

O clima na PCA é tropical chuvoso e quente, segundo classificação de Ayoade (1986), com temperaturas quentes que excedem 25°C, médias pluviométricas entre 800 mm à 1.600 mm, e possui uma circulação leste (alísios), com climas úmidos. Os ventos têm velocidade média de 5,5m/s, e direção preferencial de E (leste). Estas condições implicam em um regime de meso-marés (média de 1,48m), com ondas medindo cerca de 0,56m de altura.

A sub-bacia da PCA insere-se na Bacia Hidrográfica Litorânea do estado, formada pelo Rio Aracatimir, que deságua na Praia de Torrões, com drenagem de padrão dendrítico e paralelo. O Lagamar do Sargento é o maior corpo d'água na PCA, e é alimentado por córregos como o do Lamarão e o do Paná, com nascentes no Tabuleiro Costeiro (Formação Barreiras) e nos Depósitos Quaternários.

Na PCA, a vegetação de dunas, recobre as planícies arenosas e eólicas; o manguezal recobre as planícies estuarinas; a mata ciliar, que envolve as áreas de inundação; e a mata de tabuleiro recobre o planalto costeiro (Fernandes 2004).

### 1.3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A dinâmica da PCA depende da geologia e geomorfologia, e dos fatores que a condicionam como: climáticos/meteorológicos (ventos, chuvas, pressão, evaporação), oceanográficos (maré, onda, circulação de correntes), hidrográficos (rios e córregos), e antrópicos (Souza Filho & Paradella 2002, Klein *et al.*, 2001, 2003, Pereira & El-Robrini 2005, Li *et al.* 2008).

A aceleração das mudanças da linha de costa nas últimas décadas é notória (Klein *et al.* 2009) observada pela formação das Zonas de Erosão Acentuadas dos chamados “hot spot” erosivo (McNinch 2004), resultante da associação dos processos hidrodinâmicos, características geológicas, elevação do nível do mar e evolução geomorfológica costeira.

Assim, os processos dinâmicos, geológicos, geomorfológicos da PCA foram baseados nos conceitos de diversos autores: Morais & Sales (1985), Freire (1989), Souza (1989, 1994), Beltrami *et al.* (1994), Souza & Morais (1996), Freire & Cavalcante (1998), CPRM (2003), Maia (1997a), Maia *et al.* (1998), Sales (2002), Freire & Morais (2003), Silva Filho (2004), Maia (2005), Farias & Cavalcante (2010), dentre outros.

Vários trabalhos apresentam a avaliação das mudanças climáticas, e eventos extremos e/ou aquecimento global, das variações do nível do mar e variabilidade da linha de costa, fases retrogradacionais ou progradacionais, no intuito de quantificar os impactos gerados (Souza Filho 2000, Klein *et al.* 2003, Stone *et al.* 2004, Thornton *et al.* 2006, Callaghan *et al.* 2009, e Yoshikawa & Nemoto 2010), em longa (dezenas a centenas de anos), média (10-50 anos), e pequena escala de tempo (5-10 anos).

A dinâmica costeira foi quali-quantificada por geoindicadores, tais como escarpas de praia e plataforma de abrasão conforme sugerido por Berger (1996), Forbes & Liverman (1996), Silva (2001), e por variação da linha de maré alta (LMA), conforme Dolan *et al.* (1980), Crowell *et al.* (1991), Souza Filho (2000), com uso de imagens multitemporais de sensores remotos, em médio período (52 anos).

Na realização dos mapas, o uso das geotecnologias (sensoriamento remoto, e SIG's) para a integração dos dados baseou-se nos trabalhos de: Crosta (1993), Câmara & Medeiros (2000), Silva (2001), Florenzano (2002), Souza Filho & El-Robrini (2000), Proisy *et al.* (2000, 2002), Cohen e Lara (2003), Moreira (2003), Carvalho (2003), Souza Filho & Paradella (2005), Pinheiro *et al.* (2006), Pinheiro & Morais (2007), dentre outros.

Florenzano (2002), Moreira (2003) e Lopes & Guerardi (2003) mostram o uso da banda 7 (sete) do sensor TM do Landsat, além da composição 453, apresentando sensibilidade à morfologia do terreno, permitindo analisar a geomorfologia, solos e a geologia da área, etc.

Com o lançamento dos satélites de altas resoluções espaciais como o IKONOS-2 (0,72m no pancromático) e o Quickbird II (2,88m no multiespectral), foi possível o uso de imagens para extração de informações métricas, temáticas e de evolução do terreno, com maior exatidão espacial (Brito 2002 a, b).

A criação de um modelo conceitual Banco de Dados Geográficos (BDG's) permite a quantificação e qualificação dos dados, com integração em planos de informação, de acordo com as possibilidades e limitações (Davis Jr. 1992), importante na organização dos dados.

A interpretação das imagens e o processamento das imagens se dão com uso de SIG's, e superposição dos dados: imagem (raster), temáticos, rede, e cadastrais (atributos), com o mapeamento de forma prática, e cálculo das áreas de erosão e de deposição na linha de costa (Jensen *et al.* 1990, 1993, e 1998, El-Raey *et al.* 1996, Florenzano 2002, Carvalho 2003; Camara & Medeiros 2000, Carmona *et al.* 2004, Thieller *et al.* 2005, Callaghan 2010). A interpretação visual se deu por variáveis biofísicas: tonalidade, cor, textura, localidade (de certos alvos), forma (regular, irregular), objeto, posição (x, y) e altura (z).

As técnicas de pré-processamento incluem: a correção atmosférica e o georreferenciamento, a restauração e reamostragem de imagens (Slater 1980, Chavez 1988, Vermote *et al.* 1997, Zullo Jr. *et al.* 1997). A correção atmosférica minimiza a influência da atmosfera na resposta espectral dos alvos imageados pela absorção por gases, espalhamento por aerossóis e moléculas. A absorção subtrai valores de brilho, o espalhamento e a refração adicionam valores de brilho aos alvos.

O registro de imagens integra-as à base de dados existentes num SIG (Burrough & McDonnell 1998), por transformação geométrica que relaciona as coordenadas de uma imagem (linha, coluna) com um sistema de referência (INPE-DPI, 2002). O realce acentua as bordas das imagens, melhorando a interpretação visual.

A morfodinâmica das praias de Almofala, da Barreira e de Torrões baseou-se nos trabalhos de Guza & Inman (1975), Wright *et al.* (1982), Davis & Hayes (1984), Wright & Short (1984), Masselink (1993), Masselink & Short (1993), Short (1999), Sales (2002), Short & Trembanis (2004), Jackson *et al.* (2005), Masselink *et al.* (2006), Sedrati & Anthony (2007), Masselink *et al.* (2009), Klein *et al.* (2009), Masselink *et al.* (2010), Pianca *et al.* (2010); Yoshikawa & Nemoto (2010). Os processos harmônicos produzidos por ventos, ondas, marés e correntes derivadas, condicionam os processos erosivo-depositivos atuantes

nos sistemas costeiros, de entrada e saída de sedimentos, da morfologia praial de sistemas de barra e calha, e das mudanças nas feições.

Assim, todas essas teorias contribuíram de alguma forma para o entendimento dos diferentes processos geológico, morfológicos, ecológicos, dinâmicos e sedimentológicos dos sistemas costeiros da PCA.

O zoneamento geoambiental foi baseado nas propostas de autores como Esteves (1998), Filet (1994), Maia (1998), Morais (1996), Cicin-Sain & Knecht (1998), Souza Filho (2000), Leal (2002), Carmona *et al.* (2004), Maia & Cavalcante (2005), SEMACE (2010) com adaptações da teoria geossistêmica (Bertrand 1969, Tricart 1977, Troppmair 1989), que é um resultado da teoria sistêmica aos ambientes.

A teoria geossistêmica foi utilizada na PCA, onde o espaço deriva das relações mútuas entre os componentes físico-naturais e destes com a ação antrópica, por relação de causa e efeito (Bertrand 1969). Os geossistemas são: biostasia, com atividade morfogenética fraca ou nula, em equilíbrio entre elementos do potencial ecológico e exploração biológica (ação antrópica pode causar a dinâmica regressiva da vegetação e dos solos, sem comprometer o ambiente); resistasia, a ação morfogenética é muito ativa, comandando o mecanismo de evolução do ambiente. Podem-se ainda subdividi-los em geofácies (setores espaciais homogêneos) e geótopos (subsetores locais ou pontuais).

O potencial de suporte dos recursos naturais dado pela ecodinâmica de Tricart (1977), avalia as condições de estabilidade e de instabilidade dos ecossistemas e/ou geossistemas, em função da variação entre morfogênese e pedogênese do meio, sendo classificados em meios estáveis, de transição ou “intergrades”, e fortemente instáveis.

As alterações geoambientais causam impactos diversos na dinâmica ambiental, através do desmatamento, uso intensivo da pesca, e dos manguezais para a carcinocultura, construções de comportas na Laguna Salgada, etc. causando degradação ambiental nos sistemas. Assim, pode-se determinar áreas de risco da PCA em função dos agentes naturais e antrópicos, com estudo da vulnerabilidade ambiental, dinâmica natural, e o uso e ocupação.

#### 1.4 METODOLOGIA

A metodologia constou de pesquisa e avaliação bibliográfica da PCA, bem como de uma avaliação histórica da importância dos estudos dos aspectos meteorológicos e oceanográficos para os estudos morfodinâmicos de praias oceânicas.

Foram realizadas consultas a órgãos para aquisição de dados: meteorológicos na Fundação Cearense de Meteorologia (FUNCEME); oceanográficos no Banco Nacional de Dados Oceanográficos (BNDO) e Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN); dados de altimetria da plataforma continental no Laboratório de Geologia Marinha e Aplicada (LGMA) da UFC.

Foram realizadas 4 etapas de campo na PCA: (1) 10 a 15/05/2007 - reconhecimento de áreas, identificação das unidades e subunidades geomorfológicas, coleta de 34 amostras de sedimentos das unidades geomorfológicas, e 7 amostras para análise de 3 perfis de solos; (2) 19/03/2007, 14/07/2007 e 24/11/2007 - medição sazonal de perfis topográficos das praias da PCA; coleta de amostras de sedimentos para a caracterização morfo-sedimentar das praias e medição dos parâmetros meteorológicos e oceanográficos; (3) coletas mensais de medição do vento e sedimentos para estudo do transporte eólico (2007); (4) 10 e 11/05/2008 - coleta de pontos (x,y) e altitudes (z) com DGPS para georrefenciamento e ortorretificação das imagens Landsat para o estudo em médio período da PCA, e comprovação dos dados do mapeamento geomorfológico em campanha de campo.

A metodologia deu seqüência com análises laboratoriais da morfologia praias, medição dos parâmetros físicos, análise dos sedimentos, e parâmetros morfodinâmicos e mapeamentos no Laboratório de Recursos Minerais Marinhos (LRMM) da UFPA.

#### **1.4.1 Trabalhos de Campo**

##### **1.4.1.1 Levantamentos topográficos**

Baseou-se no levantamento de transectos transversais para a análise geomorfológica (Figura 1), e no monitoramento das praias por perfis transversais para a análise do comportamento dos parâmetros morfológicos (extensão, largura, gradiente, cotas, forma do perfil, posição da linha de maré alta e padrão de variabilidade morfológica). Para a análise granulométrica sazonal utilizou-se os parâmetros de Folk & Ward (1957).

Foram levantados: (1) 28 perfis transversais (transectos) aproximadamente a cada 500m na PCA, e 200m dentro de cada perfil, para o MDT na PCA (Figura 1); (2) 5 perfis com distância de 5m, e 2m para o MDT do sistema de duna e a praia de Almofala; (3) 5 perfis aleatórios nas praias de Almofala, da Barreira e de Torrões para análise da morfologia.

Para o uso dos dados do par de Differential Global Positioning System (DGPS), da marca Pymark2 Ashtech, foram usadas as referências de 3 pontos: (1) estação de DGPS fixa, no Marco da Estação 92397 de Itarema (IBGE 2007), Datum SAD 69, coordenadas UTM (N)

9.677.308,499 e (E) 397.876,875 (Figura 2a); (2) marco criado em Itarema, coordenadas UTM (N) 9.675.912,457 e (E) 408.556,088; e (3) pontos dos perfis topográficos. Utilizou-se o método “stop and go” (Baptista *et al.* 2006). A acurácia das posições do DGPS foi de 0-5 cm.

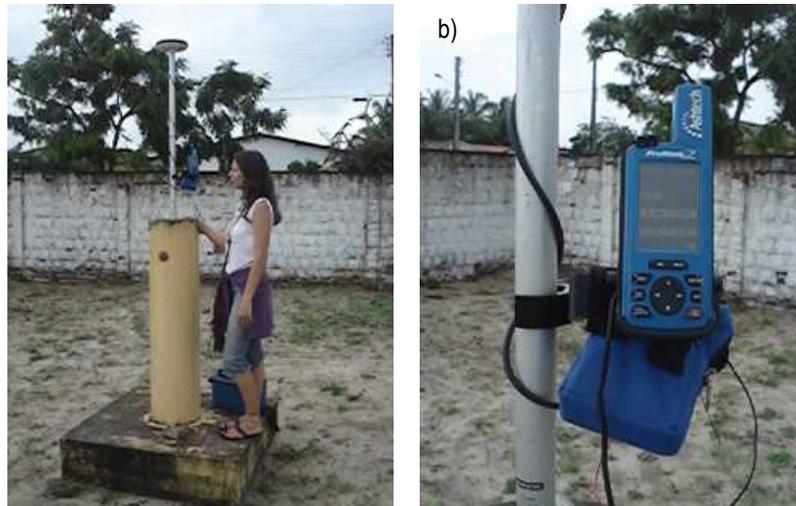


Figura 2. Posicionamento do primeiro ponto de referência Marco da Estação 92397 de Itarema (a), e DGPS Pymark2 Ashtech (b).

Os dados de amplitude de maré foram previamente adquiridos através do site, do BNDO da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN 2007).

#### 1.4.1.2 Amostragem de sedimentos

A amostragem sedimentológica seguiu 3 etapas: (1) coleta de 34 amostras de sedimentos das unidades geomorfológicas (Figura 1); (2) coletas sistemáticas de sedimentos praias (Almofala, Barreira e Torrões), concomitante aos perfis topográficos, com uso de uma tampa de tubo PVC (5 cm) com coleta dos primeiros 3 cm, referentes à deposição semi-diurna mais recente (com classes granulométricas e parâmetros estatísticos propostos por Folk & Ward (1957); (3) coletas mensais de sedimentos feitas ao longo da transição dos sistemas dunas-praias na PCA, e sistemáticas concomitante às medições de ventos, para análises do transporte eólico dos sedimentos, com armadilhas integrada e discretizada.

#### 1.4.1.3 Medição dos parâmetros meteorológicos

O vento é um parâmetro de grande importância para o estudo dos processos costeiros. Medições sistemáticas de velocidade e direção do vento foram realizadas por meio de Estação

Meteorológica Eletrônica do tipo DAVIS (*Davis Instrument*) instalada nas praias de Almofala, da Barreira e de Torrões, para estudo do potencial energético eólico, concomitante à realização dos perfis topográficos, com as armadilhas para transporte eólico (Figura 3 a/b).

As medidas foram feitas de hora em hora em cada praia, iniciando às 8:00 da manhã na praia de Almofala, terminando às 17h, das 8:15 17:15 na praia da Barreira, e das 8:30 às 15:30 na praia de Torrões, realizados nas datas 19/03/2007, 14/07/2007 e 24/11/2007, para verificação da variação horária dentro dos dias de medidas, e a variabilidade sazonal. Além de medidas mensais para o estudo do transporte eólico de sedimentos.

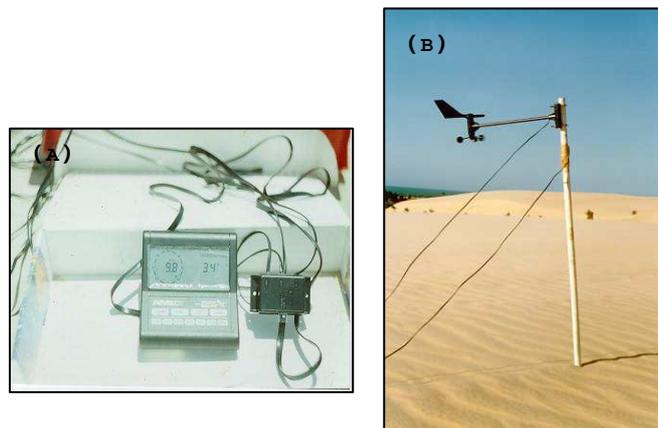


Figura 3. Estação meteorológica eletrônica Davis Instruments (a). Anemômetro (b).

As medidas dos parâmetros meteorológicos foram feitas de hora em hora, iniciando às 8:00 da manhã, terminando às 17h, das datas 19/03/2007, 14/07/2007 e 24/11/2007, para a verificação da variabilidade diária e sazonal (quadras chuvosa, intermediária e seca), além das medidas mensais (2007).

#### 1.4.1.4 Medição dos Parâmetros Oceanográficos

Os dados sobre período e altura das ondas foram obtidos segundo a metodologia descrita por Muehe (1998), com medições em trabalho de campo, e os dados compilados de medidas de correntes, ondas e marés disponibilizados pelo BNDO da DHN (2007).

Para caracterizar o regime de ondas nas praias da PCA o método envolveu a medição da altura significativa da onda na zona de arrebentação ( $H_b 1/3$ ), obtido através da diferença de altura, entre a crista e a calha subsequente, com a régua graduada. O período das ondas ( $T$ ) foi medido decorrida a passagem de 11 cristas consecutivas ( $1/10$  do tempo total).

O ângulo de incidência das ondas foi obtido através de medições com uma bússola “Brunton”, para a orientação de cada perfil topográfico, sempre em uma direção

perpendicular à linha de costa. A caracterização da deriva litorânea foi baseada nos geoindicadores, a posição e migração de feições costeiras, além dos modelos de predição de transporte “*crosshore*” (“*onshore/offshore*”) de Trenhaile (1997).

#### 1.4.1.5 Transporte litorâneo de sedimentos “*in situ*”

Para o transporte litorâneo de sedimentos da PCA foi feito: o transporte eólico, por medidas em campo e análises em laboratório, seguindo o método de Carvalho (2003), Maia (1998); e o transporte longitudinal, por cálculo da intensidade e sentido produzido pela deriva litorânea, e o nível de energia do fluxo, utilizando o método gráfico da CERC (1984).

Para o transporte eólico foi utilizado-se: (1) 3 conjuntos de armadilhas acumulativa, ou de integração de todo o material transportado através de uma seção vertical, com base no modelo de Leatherman (1978) do LGMA da UFC, formadas por um tubo de PVC com 1m de comprimento e 4cm de diâmetro, com duas aberturas verticais em lados opostos: a frontal (70cm de comprimento por 1cm de largura) e a posterior (70 cm por 2,5 cm). A abertura posterior é recoberta (tela malha - 62 micra), e a inferior por um tampão de PVC (30cm), que no chão é coletor de sedimentos; (2) 3 conjuntos de armadilhas discretizada, para o transporte na vertical, com tubo de PVC (2 cm de diâmetro e 5 cm de comprimento), e abertura frontal de 1cm<sup>2</sup> de área (1x1cm), e posterior de 4 cm<sup>2</sup> (2x2cm) (e tela malha - 62 micra).

As armadilhas de integração utilizadas apresentaram uma capacidade de acumulação em torno de 270 cm<sup>3</sup>, o que corresponde a um peso de sedimento entre 435 a 480 gramas, indicando uma densidade da ordem de 1,6 gr/cm<sup>3</sup>.

### 1.4.2 Procedimentos Laboratoriais

#### 1.4.2.1 Sensoriamento Remoto

O PDI envolveu 3 etapas: o pré-processamento, onde são aplicadas técnicas para correção das distorções geométricas introduzidas pelo sensor ou pela atmosfera; a utilização de técnicas de realce e transformações espectrais (Jensen *et al.* 1990, Jensen *et al.* 1993); e a extração de informações, por meio da interpretação visual ou classificação digital.

No PDI os valores dos pixels estimados de uma imagem, ou reamostragem, foi feita por técnicas convencionais de interpolação, como vizinho-mais-próximo, bilinear e convolução cúbica paramétrica (Fonseca & Mascarenhas 1988, Fonseca *et al.* 1993).

Para a compartimentação geológica foi criado um BDG a partir de: (1) interpretação de trabalhos de Campos (1992), Castro & Costa (1999), Lima *et al.* (2000), CPRM (2003) e Silva Filho (2004); (2) da integração de dados de campo, análise de amostras de sedimentos; (3) interpretação das imagens de satélite Quick Bird (2004), com observação da homogeneidade dos temas nas imagens; (4) confecção do mapa geológico (Figura 4), no aplicativo ArcGis 8.3, em escala de detalhe (1:50.000), e com comprovação de dados em campo.

O BDG incluiu os mapas de Hidrografia, Isóbatas e Faciologia da plataforma continental interna da PCA e adjacências no aplicativo ArcGis 8.3, tendo como base os trabalhos de Freire (1985), Freire & Cavalcanti (1998), Silva Filho (2004).

O mapa das unidades geomorfológicas da PCA foi confeccionado a partir da integração: (1) dados de campo - amostras de sedimentos, perfís topográficos, características morfoclimáticas da área, imagens Quickbird ortorretificadas, e imagens Landsat (2006), integrados em ambiente ArcGis 8.3, na escala de detalhe de 1:50.000.

Os mapas das mudanças da posição da linha de costa em médio período (52 anos - 1958/2010) foram realizados: através da integração da interpretação visual das fotografias aéreas (1958/1988), e Quickbird (2004), na escala de 1:50.000, com base em geoindicadores (escarpas de praia, plataforma de abrasão); e imagens Landsat (1977/2010), na escala de 1:100.000, com base na linha de maré alta (LMA), no EASI-PACE (PCI 8.0), e ArcGis 8.3.

Os aplicativos utilizados foram o Global Mapper, da EASI-PACE (PCI 8.0 - Geomática), e o SIG da ESRI ArcGIS 8.9, disponibilizados para uso no LAIT do Instituto de Geociências da UFPA, da Golden Software (Grapher 2.0 “2-D Graphing System 2.0), e do Surfer 8.0, no Laboratório de Modelagem de Estuário do Instituto de Geociências da UFPA.

#### 1.4.2.2 Análise de Sedimentos Arenosos

As amostras de sedimentos foram lavadas com água destilada, e secas em estufa a 50°C, no LRMM, sendo as amostras com mais de 25% de silte e argila foram tratadas através do peneiramento úmido, mediante o uso de uma peneira de 0.063 mm. A areia foi levada à estufa para secar, enquanto as frações de silte/argila foram levadas à centrífuga para separação e em seguida à estufa para secagem.

As amostras arenosas, após secas, foram quarteadas e divididas em partes de 100g, peneiradas utilizando as aberturas de malhas de 2.000, 1.400, 1.000, 0.710, 0.500, 0.355, 0.250, 0.180, 0.125, 0.090 e 0.063 mm, e finalmente, todas as frações, areia, silte e argila

foram pesadas, e as classes granulométricas e os parâmetros estatísticos foram propostos por Folk & Ward (1957).

#### 4.4.2.3 Procedimentos laboratoriais do transporte litorâneo de sedimentos

As medidas de ventos tomadas em campo foram analisadas estatisticamente, e foram realizados gráficos para análise da variabilidade sazonal dos ventos de cada praia, utilizando o programa Excel 2003. Os dados de ondas obtidos em campo foram preparados e organizados em tabelas, no programa Excel 2003, para a análise nos aplicativos ISRP e o Surfer 8.0.

Para o cálculo do transporte eólico foi utilizado o modelo <sup>(1)</sup> criado por CNPQ (2003) para a zona costeira cearense, feito através de experimentos que concluem que o transporte de sedimentos (gr/s) cresce exponencialmente com o aumento da velocidade do vento (m/s), definido por estimativa não linear, com coeficiente de correlação de  $r=0,92$  entre as variáveis.

$$y=0,0018*V1m^{**2,28}$$

(1)

O modelo CNPQ (2003) utiliza resultados e experimentos de Maia (1998) que definiu que o perfil vertical de velocidade do vento segue uma distribuição logarítmica de acordo com a equação de Von Kármán (1934) *in* Sherman & Hotta (1990). Este modelo é resultante da adaptação da proposta de Bagnold (1941) em dunas desérticas, sendo Q é o transporte total em m<sup>3</sup>/ano, L é a longitude da praia em metros e T a duração do vento em segundos.

Para o cálculo da intensidade e sentido do transporte longitudinal de sedimentos produzido pela deriva litorânea, foi utilizado um método gráfico com base nos procedimentos da CERC (1984). A partir da confecção desses diagramas foi definido o ângulo de aproximação e altura das ondas na zona de arrebentação, utilizados para a discriminação do processo de dissipação de energia das ondas e determinação do sentido e intensidade do transporte de sedimentos ao longo da linha de costa, cujo método utilizou dados referentes aos períodos, altura e direção das ondas medidas em campo (Carvalho 2003, U.S. Navy 1978).

### 1.4.3 Análise Estatística Multivariada

Existem diversas aplicações da análise multivariada e de variância dos dados ambientais, dentre estas, destaca-se sua importância nos estudos que utilizam dados de

sensorial e remoto. Destacam-se, ainda, trabalhos como o de Johnson & Wichern (1998) que aplicou a estatística multivariada e análise de contrastes ortogonais entre médias (teste “t”) das variáveis do relevo obtidas em amostras circulares de 10 km<sup>2</sup>, para agrupar amostras segundo graus de similaridade.

## 1.5 ASPECTOS FÍSICO-AMBIENTAIS NA PLANÍCIE COSTEIRA DE ALMOFALA

### 1.5.1 Aspectos Geológicos na Planície Costeira de Almofala

A geologia e geomorfologia da PCA foram apresentadas em diversos trabalhos: evolução tectono-sedimentar da Bacia do Ceará (Costa *et al.* 1990); Bacia do Ceará (Beltrami *et al.*, 1994); delineamento do pé do talude na margem continental do Ceará através da integração de dados geológicos e geofísicos Campos (1992); mapas gravimétricos do estado do Ceará Castro & Costa (1999); compartimentação territorial e gestão regional do Ceará (Lima *et al.* 2000); atlas de geologia e recursos minerais do Ceará (CPRM 2003); e domínios morfoestruturais da plataforma continental do Ceará (Silva Filho 2004).

Assim, a evolução geológica da PCA está ligada aos movimentos extensionais que separaram os continentes da América do Sul e África, a partir do final do Mesozóico, às oscilações do nível do mar e aos processos neotectônicos que controlaram a deposição das seqüências estratigráficas da Formação Barreiras - do Neógeno (Mioceno/Plioceno) ao Quaternário (Pleistoceno), e do Pós-Formação Barreiras - do Quaternário (Holoceno).

Na PCA, pode-se observar 2 unidades geológicas principais: a Formação Barreiras, com evolução iniciada no Neógeno (Mioceno/Plioceno), de formações tectonicamente estáveis; e os Depósitos Quaternários com diversas subunidades, caracterizadas por depósitos sedimentares recentes (Holoceno) (Castro 1990, Campos 1992, Castro *et al.* 1998, Castro & Costa 1999, Silva Filho 2004).

### 1.5.1.1 Considerações sobre a Evolução Neotectônica

A evolução da PCA está associada a movimentos neotectônicos, e morfoestruturais (Freire 1985, Saadi & Torquato 1992, Silva Filho 2004). A área se insere na Sub-bacia de Acaraú (Bacia do Ceará), cercada na área emersa leste por falha inferida (Figura 4) de direção NE-SW, seguindo o sentido do rio Aracatimirim, com início na região de Sobral e Itapipoca.

Os movimentos neotectônicos intraplacas (Hasui 1990) iniciaram no Mioceno Médio (início da deposição da Formação Barreiras e das bacias costeiras) no final da construção da Superfície Sul-Americana, com o encerramento das manifestações magmáticas até então ativas (interrompida por soerguimentos no Mioceno).

O período mais recente é caracterizado por mudanças no regime tectônico, passando de distensivo para compressivo, chamado de Regime Neotectônico, com transformação no modelado da costa até a forma atual, período marcado por transgressões marinhas conhecidas pela evolução da Formação Barreiras no Neógeno (Mioceno/Plioceno), onde o nível do mar encontrava-se abaixo do atual (Saadi & Torquato 1992).

A transpressão associada à movimentação dextral cenozóica é marcada por falhas do trend NE-SW (Saadi & Torquato 1992). Segundo Silva Filho (2004), ocorre uma inflexão na região de Acaraú (a qual a PCA está inserida), que interfere no controle dos entalhes por estruturas NE-SW, possivelmente, herança de feições pré-cambrianas profundas do Domínio Noroeste do Ceará, com sobreposição de um trend E-W na porção mediana, e reflexo do controle das estruturas do estágio sin-transformante.

A região de Sobral e Itapipoca encontram-se na área de embasamento pré-brasiliano (início da falha inferida NE-SW), localmente reativado pela orogenia brasiliana como comprovam diversos trabalhos (Beltrami *et al.* 1994, Silva Filho 2004, Sales & Peulvast 2007) com ocorrência de sismos de 2 à 5 na escala Richter. Sismos de até 4 na escala Richter, ocorreram por mais de 1 mês no ano de 2008 (de fevereiro à março) (Roratto 2008).

### 1.5.1.2 Caracterização e Compartimentação Geológica na PCA

A PCA é caracterizada por um empilhamento estratigráfico composto de rochas Pré-Cambrianas na base (Costa *et al.* 1990, Costa 2001, Beltrami *et al.* 1994, Silva Filho 2004), sobreposta pela Formação Barreiras, sob os Depósitos Quaternários (Holoceno).

Na região do norte da Bahia, segundo Vilas Boas *et al.* (2001), a deposição da Formação Barreiras se deu por fluxos de massa, com transporte de sedimentos arenosos e

argilosos em clima semi-árido, como produtos de ambiente fluvial e de leque aluvial. Estas mesmas características foram identificadas na Formação Barreiras da costa oeste cearense (Sales 2002, e Silva Filho 2004).

Duas grandes unidades geológicas afloram na PCA: a Formação Barreiras, ocupa uma área de 8.066.611m<sup>2</sup>, cerca de 24,22% da área total; e os Depósitos Quaternários, com 25.271.014 m<sup>2</sup>, cerca de 75,78% da área.

A evolução geológica de margem passiva na PCA está ligada à atividades tectônicas distensivas e compressivas, responsáveis pela estrutura de falha inferida na direção NE-SW (Figura 4), que segue o sentido do rio Aracatimirim (Figura 4), e pelo sistema de falhas normais na plataforma continental interna, com sentido W-E, e depois se desviando para o sentido NW-SE.

Os Depósitos quaternários constituem a maior parte da PCA incluem: os depósitos de dunas móveis e fixas: eolianitos colonizados por vegetação; os depósitos marinhos de praia; e os depósitos aluviais.

#### *1.5.1.2.1 Pré-Cambriano*

O embasamento regional é representado pelo Grupo Ceará e insere-se na Faixa de Dobramentos Jaguaribeana, gerados por tectônica extensional. Possui dois conjuntos: (1) Arqueano - é constituído de xistos e gnaisses de composição tonalítica a granodiorítica, com bandamento magmático e (2) Proterozóico - consiste em metaquartzitos aluminosos e uma grande expressão de mármore e calciossilicáticas que determinam horizontes intercalados com rochas pelíticas, sendo comuns a presença de rochas alcalinas, subalcalinas e gnaisses sieníticos com acamamento migmatítico de pequena escala (Caby & Arthaud 1986, CNPQ 2003, Silva Filho 2004).

Na PCA, as estruturas pré-cambrianas não afloram, e são sobrepostas pelos sedimentos da Formação Barreiras e do Pós-Barreiras (CPRM 2003, Silva Filho 2004).

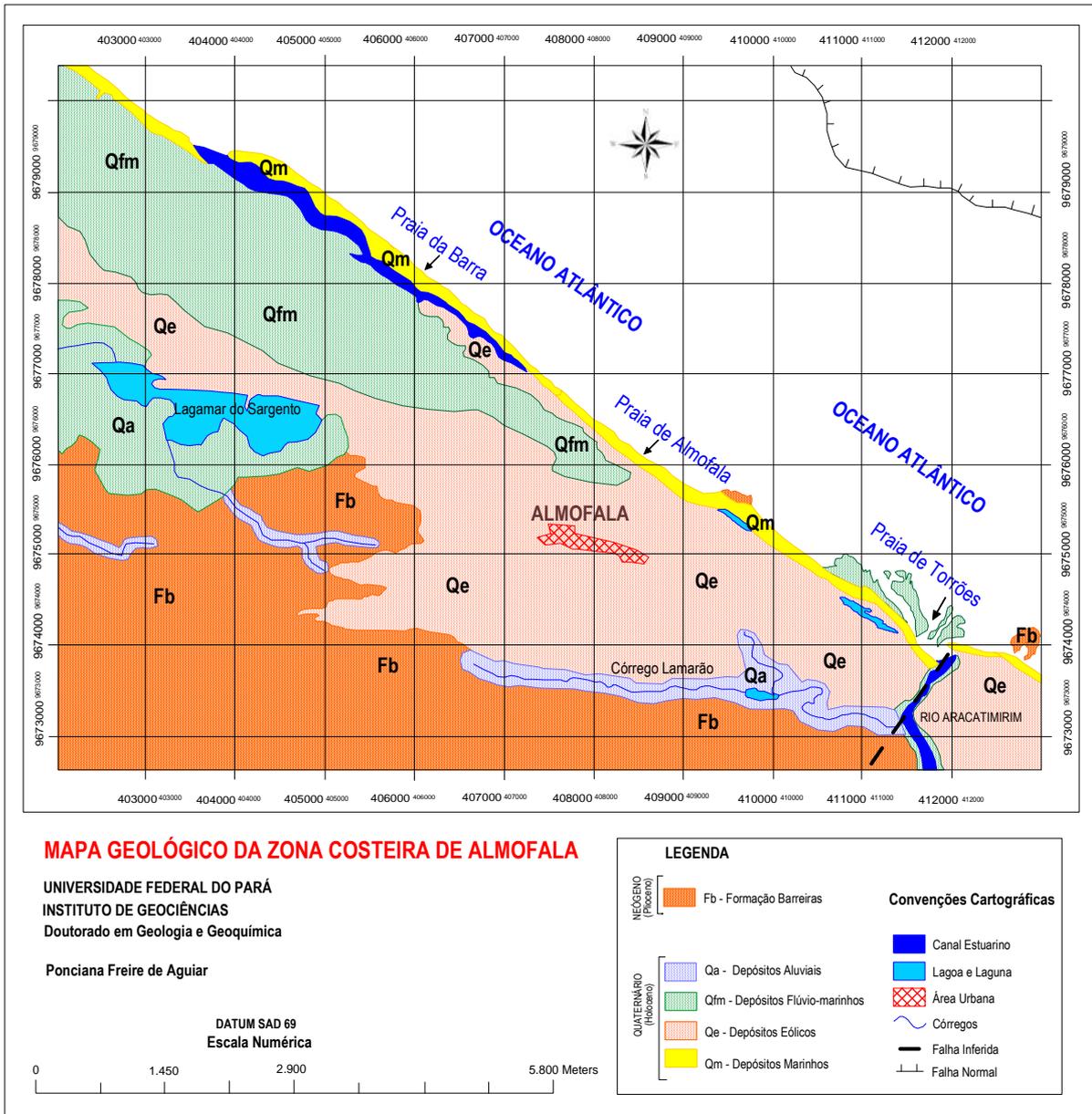


Figura 4. Mapa Geológico da planície costeira de Almofala.

### 1.5.1.2.2 Neógeno/Quaternário (Formação Barreiras)

Na PCA, a Formação Barreiras é formada por um empilhamento de diversas subunidades neógenas/quaternárias como resultado da evolução do relevo, dos movimentos tectônicos e paleoclimáticos (AQUASIS 2003).

A Formação Barreiras, ocorre na parte interna da PCA (Figuras 4 e 5), ocupando uma área total de 8.066.611m<sup>2</sup> (24,22% da área total de trabalho) a retaguarda dos depósitos eólicos, recortadas por interflúvios, como o rio Aracatimirim, por onde segue uma falha inferida. Os sedimentos são arenosos a argilosos, em camadas horizontais ou lenticulares, com pequenos diastemas marcados por leitos de seixos, com cores vivas e estratificação irregular (Silva Filho 2004).



Figura 5. Afloramentos da Formação Barreiras na estrada de Itarema (a,b); c) níveis conglomeráticos.

A plataforma de abrasão esculpida em sedimentos da Formação Barreiras ocorre em pontos distintos na Praia de Almofala, e na margem direita da foz do rio Aracatimirim (Figura 4) e ocupa uma área de 34.654 m<sup>2</sup> (0,10%), da área total de 8.066.611m<sup>2</sup>.

Ocorrem ainda trechos de plataforma de abrasão na praia de Almofala (Figura 6a, b), onde pode observar uma falha no sentido NW-SE (Figura 6c). Em praias cearenses como Fortaleza, Paracuru e Iguape afloram as chamadas “beach rocks” que se diferem da plataforma de abrasão pela constituição de variações físico-química fluvio-marinhas (Maia 1998), associadas as desembocaduras fluviais atuais ou pretéritas.



Figura 6. Afloramento da Formação Barreiras na praia de Almofala (a e b); em destaque falha no sentido NW-SE (c).

#### 1.5.1.2.3 Unidades Quaternárias

As mudanças do nível do mar e variações paleoclimáticas durante o Quaternário (Holoceno), desempenharam um papel importante na evolução geológica e distribuição dos sedimentos na PCA.

Os Depósitos Quaternários da PCA (Figura 4) ocupam uma área de 25.271.014m<sup>2</sup> (75,78%) e são formados por depósitos: aluviais (944.911m<sup>2</sup> - 2,83%), com textura areno-argilosa (média, e fina à muito fina) com presença dos diatomitos (Figura 7); flúvio-marinhos (7.931.986m<sup>2</sup> - 21,69%), areno-lamosos e muito ricos em matéria orgânica; eólicos (15.343.353m<sup>2</sup> - 46,01%) de textura arenosa média (Figura 8); e marinhos (837.031m<sup>2</sup> - 2,51%) com textura arenosa média.



Figura 7. Laguna Salgada na planície costeira de Itarema originada por processos de fechamento de barras arenosas.



Figura 8. Dunas fixas por vegetação na margem esquerda do canal de maré (c), e eolianitos na margem direita do canal (c), morfologia de dunas preservada por cimentação do carbonato de cálcio (a) (b) (c) e (d).

### 1.5.2 Aspectos Hidrográficos

No início de cada ano, inicia-se a chamada quadra chuvosa, quando a precipitação e a vazão dos rios são maiores, estendendo-se até maio, os outros meses são condicionados a baixas vazões, assim o regime fluvial encontra-se diretamente condicionado ao regime pluvial.

A PCA está inserida na Bacia Hidrográfica Litorânea do Ceará. A sub-bacia é formada pelo rio Aracatimirim (Figura 9), de grande extensão (87 km), com foz na Praia de Torrões, com vazão alta, exorréica (deságua no mar), perene, e nascentes nos sertões subterrâneos. O padrão de drenagem é drendrítico e paralelo (as rochas oferecem resistência uniforme à erosão) (Feitosa & Manoel Filho 1997).



Figura 9. Estuário do rio Aracatimirim desagüando na praia de Torrões.

As principais lagoas da planície costeira de Itarema são: a Lagoa do Mato, com 1km<sup>2</sup> de superfície; a Laguna Salgada, com 9.000.000m<sup>2</sup>, possui ligação com o mar por um canal de maré (Figura 10), é o maior reservatório de água. O Lagamar do Sargento é a principal laguna da PCA, e possui ligação com a Laguna Salgada, por canal de maré. Formaram-se por fechamento de barras no Holoceno (Esteves 1999), com nascentes na Formação Barreiras, e nos Depósitos Quaternários.

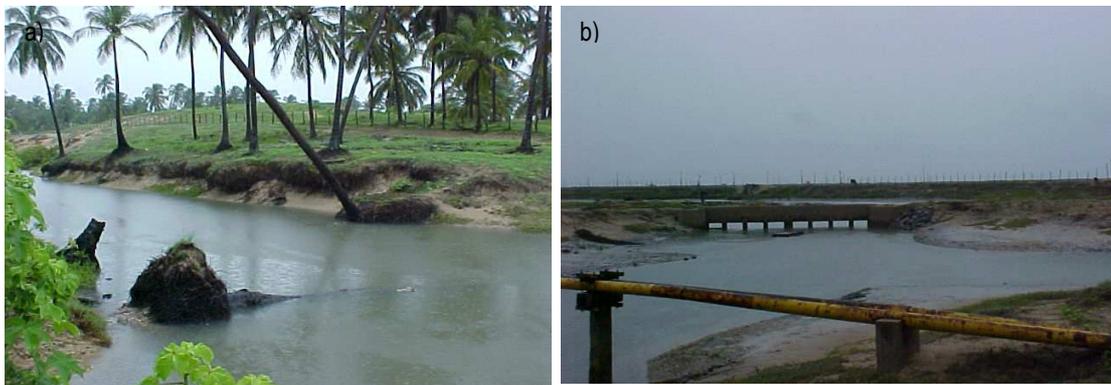


Figura 10. Canal de maré que tem ligação com a Laguna Salgada, montante (a), e juzante (b), na praia da Barra.

Os principais córregos da planície costeira são: o Córrego Grande (Figura 11b) com 15 km de extensão, córrego do Riacho com 12 km, e outros menores que não ultrapassam 6 km, como o córrego do Lamarão (Figura 11a), e córrego do Paná (Figura 11c). Os pequenos rios e córregos seguem a orientação do relevo com caimento W-SE e W-E (Figura 12), formando um modelo de drenagem paralela.



Figura 11. Córrego do Lamarão (a); Córrego Grande (b); e Córrego do Paná (c).

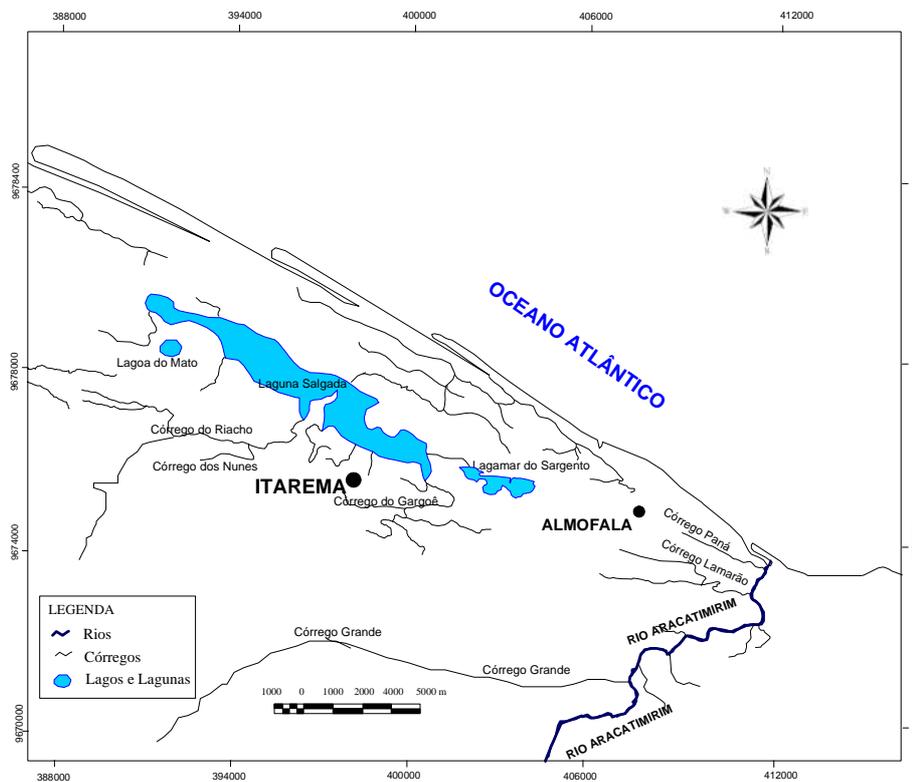


Figura 12. Mapa hidrográfico da planície costeira de Almofala e adjacências.

### 1.5.3 Solos

Os solos na PCA são faixas litorâneas correspondendo a terrenos recentes (Holoceno), com relevo plano a suavemente ondulado e que podem vir com associação das Areias Quartzosas Distróficas e/ou com solos halomórficos (Jacomine, 1973). A PCA possui as classes e/ou associações de solos: Neossolos (AMd - Areias Quartzosas Marinhas Distróficas

- Neossolos 1, e AQd - Areias Quartzosas Distróficas - Neossolos 2), Gleissolos (SKS - Solonchak Sódico), e Planossolos (PLS - Planossolos – Planossolos 1, SS3 - Solonetz solodizado – Planossolos 2) (Tabela 1).

Tabela 1. Textura dos grãos dos perfis de solos na PCA (Lima *et al.* 2000).

Classe de Solo Perfis	Horizonte			
		Areia	Silte	Argila
RQ - AQd - Neossolos 1	A	79,2	12,3	8,5
Perfil 1	C	81,1	5,9	13
RQ - AQd - Neossolos 2	A	79	7,9	13,1
Perfil 2	C	79,1	7,1	13,8
PLS - Planossolo	A	40,2	14,2	45,6
Perfil 3	Bt	25,3	12,7	62
	C	39	16,8	44,2

### 1.5.3.1 Neossolos

#### 1.5.3.1.1 Neossolos Quartzarênicos 1 (Areias Quartzosas Marinhas Distróficas)

Os solos AMD's são derivados de sedimentos arenoquartzosos de origem marinha (Holoceno), não hidromórficos, não consolidados. Possui horizonte A moderado a fracamente desenvolvido, com horizontes A e C, com areia >80%, e relevo plano a suavemente ondulado (Figura 13). A textura arenosa/média, pouco a muito profunda, com pouquíssimo ou nenhum teor de argila e excessivamente drenados. Ocupam o campo de dunas e a faixa praial, e podem vir associados a AQD e/ou com solos halomórficos.



Figura 13. Neossolos Quartzarênicos nas dunas da praia de Almofala (a), e nas dunas da praia de Torrões (b).

### 1.5.3.1.2 Neossolos Quartzarênicos 2 (Areias Quartzosas Distróficas)

Os solos AQD's são pouco desenvolvidos, não hidromórficos, profundos a muito profundos, excessivamente drenados, em grãos simples, com baixos teores de argila. Apresentando seqüência de horizontes AC, o C possui espessura superior a 200 cm, cores mais claras (bruno, bruno-claro-acinzentado, bruno avermelhado-escuro e bruno-escuro).

O Perfil 1 (Figura 14a) possui 8,5% de argila no horizonte A, e 13% no horizonte C, baixa soma de bases e muito baixa saturação de bases. O horizonte A possui espessura de 10 a 30 cm, sendo normalmente do tipo fraco, e por vezes moderado. O Perfil 2 (Figura 14b) possui 13,1% de argila no horizonte A, e 13,8% no C. Pode vir associado a PVd's, com textura arenosa/media e argilosa. Os AQD's ocorrem nos tabuleiros litorâneos da PCA.

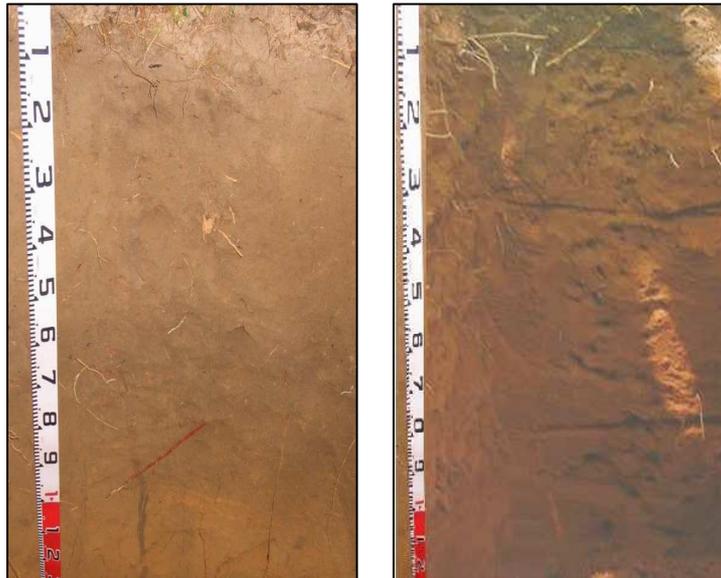


Figura 14. Perfil 1 Neossolo Quartzarênico (a) e Perfil 2 Neossolo Quartzarênico (b), nos tabuleiros litorâneos da PCA.

### 1.5.3.2 Gleissolos (Solonchak Sódico)

São solos halomórficos, com acumulação de sais solúveis nos horizontes superficiais, e percentagem de saturação com sódio trocável maior que 15% em algum horizonte, concentração de material orgânico. Ocorrem nas zonas pré-litorânea e litorânea, especialmente na foz dos principais rios e ao longo de seus cursos e em margens de lagoas costeiras.

O horizonte C pode ser gleyzado ou não. O elevado teor de carbono diminui a reflectância do solo, são deposições fluviais recentes em relevo plano de várzeas, planícies

aluvionais e áreas deprimidas com excesso de água, e podem vir associados a solos indiscriminados de mangues e aluviais. Apresentam riscos de inundações frequentes, ocorrem na localidade da Volta do Rio (Figura 15), e na planície estuarina do Rio Aracatimirim.



Figura 15. Solos do tipo Gleissolos na Laguna Salgada.

### 1.5.3.3 Planossolos

#### 1.5.3.3.1 *Planossolos 1 (Planossolo Solódico)*

São solos com horizonte B textural Perfil 3 (Figura 16) com argila no horizonte A de 45,6%, e 62% no horizonte Bt, e 44,2% no C, saturação com sódio ( $100.Na/T$ ) entre 6 e 15%, drenagem imperfeita, na quadra chuvosa tem encharcamento, e na seca ressecamento.

O horizonte A é fraco a moderado, textura arenosa/média, por vezes argilosa, e relevo plano a suavemente ondulado. São solos rasos com B textural, e relevo plano. Pode vir associado a solonetz solodizado e a podzólico. Tem seqüência de horizontes A, Bt e C, e alta saturação de bases (V%). São muito susceptíveis a erosão e ocorrem na parte interna da PCA, as margens do rio Aracatimirim.



Figura 16. Perfil 3 Planossolo Solódico às margens do rio Aracatimirim.

#### 1.5.3.3.2 Planossolo 2 (*Solonetz Solodizado*)

São solos halomórficos, caracterizados por horizonte A moderado de textura média/argilosa, horizonte B textural bastante diferente dos demais, o solonézico ou nátrico, definido como uma modalidade especial de horizonte B argílico, e elevado teor de sódio no horizonte C, igual ou maior que 15% nos 40 cm superiores (Soil Taxonomy 1975 *in* BRASIL 1981).

São solos rasos, imperfeitamente ou mal drenados, com reação moderadamente ácida a praticamente neutra, e muito susceptíveis a erosão, com seqüência de horizontes A, Bt e C, e mudança abrupta do A para o Bt. Dispõem-se em estreitas faixas, acompanhando a morfologia do rio Aracatimirim, a Laguna Salgada e margens de córrego Lamarão (Figura 17), com vegetação de estepe e/ou mata ciliar secundária, em relevo plano a suavemente ondulado, associado ou não a planossolo solódico e solos aluviais.



Figura 17. Planossolos às margens do Córrego Lamarão.

#### 1.5.5 Vegetação na Planície Costeira de Almofala

A fitogeografia da PCA (Fernandes, 2000) por critérios ecológicos-vegetacionais-florísticos, inclui-se na Subprovíncia Litorânea ou Costeira (Quadro 3). Dentre as formações vegetais existentes na PCA, destacam-se: a Vegetação de Dunas, o Manguezal, a Mata Ciliar, a Mata de Tabuleiro.

QUADRO 3 - Classificação Fitogeográfica de Fernandes para a Subprovíncia Litorânea ou Costeira (Fernandes 2000).

Subprovíncia	Setores	Subsetores
Litorânea ou Costeira	Setor Talássico ou Marinho	
	Setor Praiano ou Arenoso	Ante-duna ou Pós-praia (ou berma)
		Dunas
	Restinga ou Tabuleiro Litorâneo	
	Mangue ou Palustre	

#### 1.5.5.1 Mata Ciliar

Esta vegetação encontra-se nas margens de córregos e lagoas e outros corpos d'água associados ao Lagamar do Salgado, são perenifólias em função da umidade. Áreas onde ocorrem influencia das marés, desenvolvem-se uma vegetação típica de solos orgânicos (mangues), e predominam a *Rhizophora mangle l.*, *Avicenia* e *Langucularia Racemosa*, e na planície de inundação, com solo areno-lamoso, ocorre: carnaúba (*Copernicia cerifera*), associada ao mulungu (*Erythrina velutina*), juazeiro (*Zizyphus joazeiro*), oiticica (*Licania rígida*), e ingá-bravo (*Lonchocarpus sericeus*) (AQUASIS 2003).

#### 1.5.5.2 Vegetação Costeira

A vegetação de tabuleiro na PCA corresponde a um complexo florístico que inclui espécies de caatinga, de cerrados e de mata atlântica, possui tipo semiperenifólio (permanece verde com 90% das folhas) e caducifólio (cai grande parte das suas folhas). A queda das folhas é uma estratégia de defesa das plantas à limitação da água. Algumas espécies: pau d'arco roxo (*Tabebuia avellanedae*), caraíba (*Tabebuia caraíba*), arapiroca (*Pithecellobium foliolosum*), freijó (*Cordia trichotoma*), Angelim (*Andira retusa*) e cajueiro (*Anacardium occidentale*).

Na faixa de praia não existe vegetação, devido a dinâmica litorânea. A vegetação ocorre nas dunas, na pós-praia, planícies ribeirinhas e lacustres, e inclui manguezais, situados nas planícies flúvio-marinhas.

A vegetação das dunas na PCA recobre uma área que se inicia no fim da pós-praia até o limite dos tabuleiros, sendo parte da vegetação pioneira, perenifólia (Figura 18). A barlavento, a vegetação é arbustiva ou herbácea e a sotavento de porte arbóreo, fixa dunas. As espécies são: capim (*Paspalum maritimum*, *Panicum vaginatum*), salsa (*Ipomoea assarifolia*),

salsa de praia (*Ipomoea pes-caprae*), pinheiro da praia (*Remirea maritima*), brejinho de praia (*Iresine portulacoides*), murici (*Byrsonima cerícea*), João-mole (*Pisonia tormentosa*), jucá (*Caesalpinia férrea*), juazeiro (*Zizyphus joazeiro*), pau d'arco roxo (*Tabebuia ave-llanede*) e cajueiro (*Anacardium occidentale*).

Na ante-duna da PCA, a vegetação é de porte herbáceo e rasteiro, e é constituída por plantas halo-psamófilas ou mesmo psamófilas, pertencentes à espécies adaptadas a ambientes extremamente severos, com alta salinidade e insolação. Em algumas áreas, desta zona, pode-se observar coqueirais, sendo uma vegetação antrópica, com espécies representativas: *Iresine portulacoides*, *Remirea marítima*, *Sesuvium portulacastrum*, *Hydrocotyle umbellata*, *Ipomoea pés-caprae*, *Paspalum vaginatum*, *Canavalia obtusifolia*, *Sophora tomentosa*, *Alternanthera marítima*, *Chamaecrista hispidula*, *Sida ciliaris*, *Mimosa misera*, etc (Fernandes, 2000).

Os manguezais ocorrem nas planícies estuarinas da PCA (Figura 19), em condições adversas (deficiência de oxigênio; solos pobres, ácidos e pouco compactos; grandes variações de salinidade; correnteza, fluxo e refluxo de maré; etc.), de ambiente florestal denso, pobre em espécies vegetais. Tem-se 4 gêneros: mangue vermelho (*Rhizophora mangle*), mangue siriúba (*Avicennia shaueriana*), mangue branco (*Laguncularia racemosa*), mangue canoé (*Avicennia nítida*) e em menor proporção o mangue-de-botão (*Conocarpus erecta*), nas áreas de menor influência da maré.



Figura 18. Vegetação de praia e de dunas na praia de Almofala.



Figura 19. Manguezal na praia da Barreira.

### 1.5.6 Condições Climáticas e Meteorológicas na Planície Costeira de Almofala

A PCA é influenciada por um clima das baixas latitudes com domínio das massas de ar quentes (equatoriais e tropicais), temperaturas  $> 20^{\circ}\text{C}$ , com médias pluviométricas 1195,36 mm. Prevalece a circulação leste (alísios), com climas úmidos nas costas.

#### 1.5.6.1 Regime Pluviométrico e Térmico na Planície Costeira de Almofala

A dinâmica atmosférica na PCA é controlada pela ZCIT, sendo classificado como clima tropical chuvoso e quente (Awh), de acordo com a classificação de Köppen *in* Ayoade (1986), e baixas amplitudes térmicas usualmente, menor que  $3^{\circ}\text{C}$  (Ayoade 1986). Possui temperaturas variando entre a máxima de  $30^{\circ}\text{C}$  e mínima de  $22^{\circ}\text{C}$ , com temperatura da água do mar entre  $27^{\circ}\text{C}$  no verão a  $22^{\circ}\text{C}$  no inverno (Rocha *et al.* & El Robrini, 2002). As chuvas concentram-se entre janeiro e maio, com máximo e mínimo de 266 e 233 dias de sol ao ano.

O município de Itarema apresenta uma média histórica de precipitação de 1.195,36 mm do ano 1977 à 2010 (FUNCEME 2010). Os dados totais pluviométricos históricos anuais apresentam um pico máximo de 2.900 mm e um mínimo de 350 mm (Figura 20).

O pico de maior precipitação foi em abril de 1985 para Itarema (Figura 21), com 800 mm (Goovaerts 2000).

1.5.6.2 Atuação de Eventos Extremos

Anomalias climáticas como El Niño, caracterizam-se por um aquecimento anormal das águas do Oceano Pacífico, que interfere na circulação atmosférica e oceânica de grande escala e provoca mudanças nas condições climáticas de várias regiões, com aumento ou diminuição das temperaturas do ar, do mar e das precipitações.

Foram registrados fortes eventos de El Niño em 1982/1983, 1997/1998, e de intensidades (Quadro 4) moderada a forte de 1977/1978, 1986/1987, 1992/1993, 1993/1994, 2002/2003, 2004/2005, 2006/2007, e 2009/2010. Tem-se registros do La Niña nos anos de 1973/1974, 1974/1975, 1984/1985, 1988/1989 e 1995/1996, 1998/1999, 1999/2000, 2001/2002, 2008/2009 (FUNCEME 2010, Souza 2005).

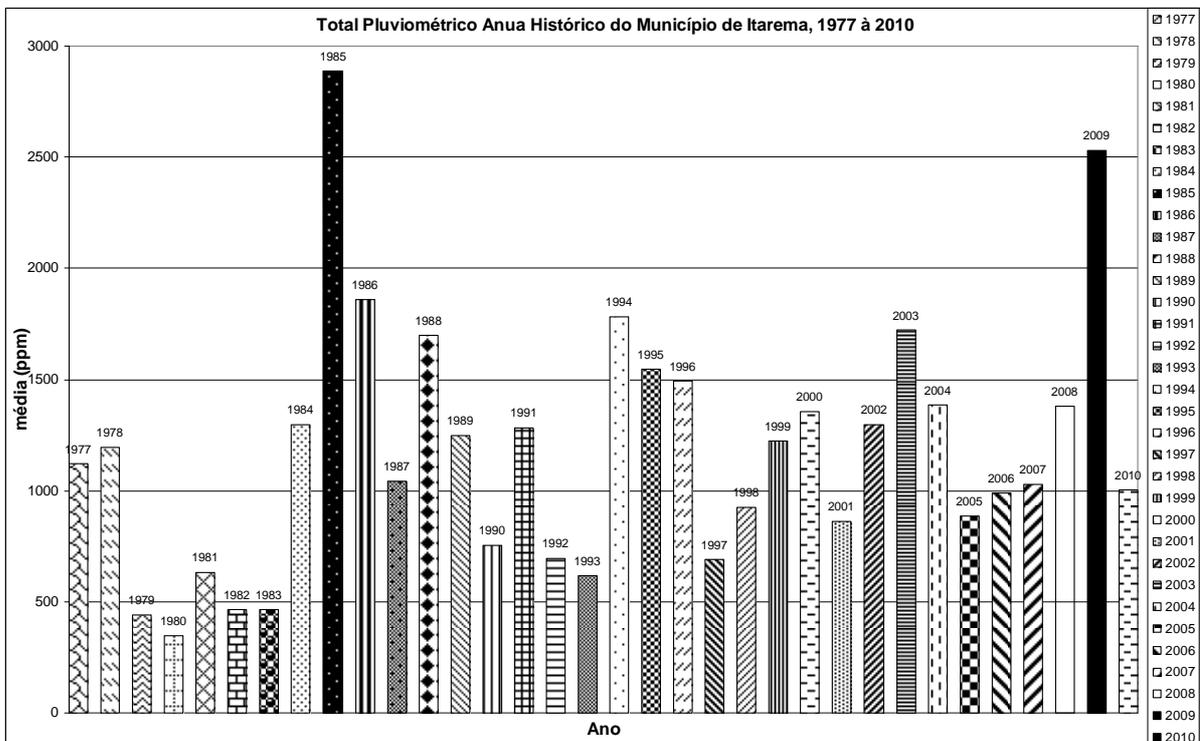


Figura 20. Totais pluviométricos históricos no Município de Itarema (1977 à 2010) (Fonte: FUNCEME 2010).

Quadro 4. Classes de Intensidade de El Niño, La Niña e Neutro (FUNCEME 2010)

Classes de Intensidade em °C (FUNCEME, 2010)			
El Niño	El Niño	El Niño	Neutro
Fraco	Moderado	Forte	-0,5 <= Antsm* <= 0,5
0,5 >Antsm* <= 1,0	1,0 >Antsm* <= 1,5	Antsm* > 1,5	
La Niña	La Niña	La Niña	
Fraca	Moderada	Forte	
(-1 >Antsm* <= -0,5)	-1,5 >Antsm* <= -1,0	Antsm* < - 1,5	(*Antsm = Anomalias TSM)

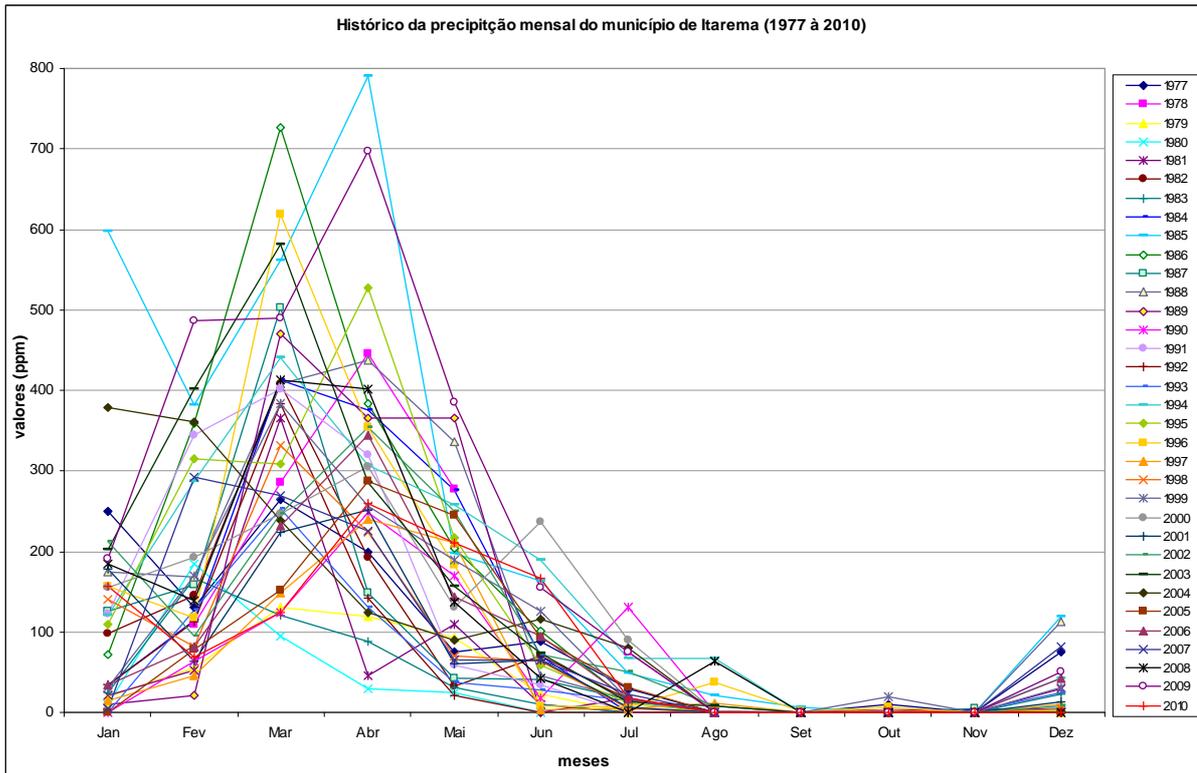


Figura 21. Média mensal histórica da precipitação no Município de Itarema (1977 à 2010) (Fonte: FUNCEME 2010).

Entre 1982 à 2000, ocorreram dois fortes eventos El Niño (Quadro 4), os mais intensos de 1982/1983, e de 1997/1998, com anomalias positivas, caracterizando um aumento na temperatura do mar (TSM) de mais de 3°C (Figura 22).

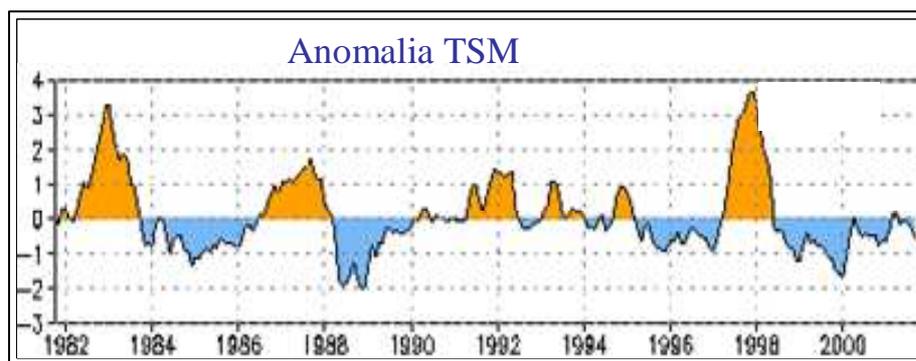


Figura 22. Anomalia TSM de 1982 à 2000 no Pacífico Tropical (Fonte: CPTEC, 2008).

Entre os anos de 2002 à 2010, ocorreram dois fortes eventos El Niño (Figura 23), sendo o mais intenso o de 2010, com anomalias positivas da temperatura de superfície do

mar (TSM), caracterizando um aumento da TSM de mais de 3°C. Um forte evento La Niña, ocorreu em 2009 com valores abaixo de -3°C (Figura 23).

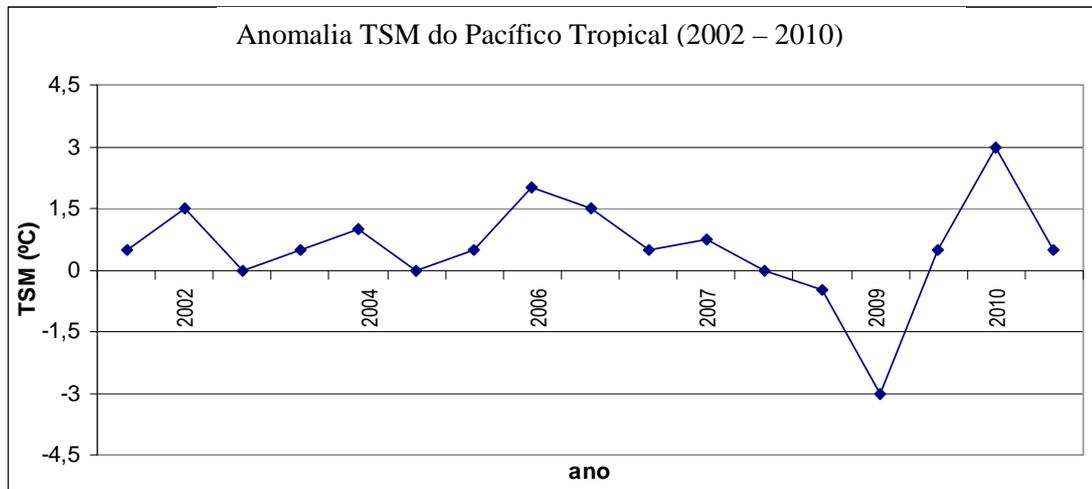


Figura 23. Anomalia TSM no Pacífico Tropical (2002 à 2010) (Fonte: FUNCEME 2010).

As ressacas do mar são fenômenos no litoral cearense, comuns no início dos anos, são causadas por tempestades no Atlântico Norte, que propagam as ondas até as praias do estado, e se elevam com a amplitude das marés de sizíguas, agravando a erosão costeira, como nas praias de Icaraí, Lagoinha, Cumbuco e Caponga (Funceme 2010). Nas praias da PCA as ressacas do mar elevam o recuo da linha de costa.

#### 1.5.6.3 Regime sazonal dos Ventos na PCA

A presença de uma célula de baixa pressão sobre o litoral cearense, e a influência da ZCIT na oscilação dos ventos alísios caracterizam o regime de ventos nas praias de Almofala, da Barreira e de Torrões, com baixos valores e gradiente de pressão atmosférica (FUNCEME 2008).

A pressão atmosférica da PCA variou de 1016 à 1003,9 (FUNCEME 2010), de setembro de 2004, à janeiro de 2006, de acordo com dados de média mensal, comprovando o baixo gradiente de pressão, o que influencia positivamente a intensidade dos ventos.

Conforme o mapa de direção dos ventos (Figura 3) confeccionado a partir das medições sazonais na praia de Almofala, as principais direções de vento são de ENE, em março na quadra chuvosa, ESSE em julho, quadra intermediária, e E em novembro, correspondente à quadra seca.

As maiores variações observadas nas medições e análises dos ventos foram na praia de Almofala, tanto em relação às mudanças de velocidade medidas nos diferentes horários dos dias, quanto sazonalmente.

Os ventos mais elevados apresentaram-se nas três praias entre o horário de 12:00 e 13:30 (2007), com pico em torno de meio dia na praia de Almofala, ultrapassando 8m/s em novembro. As maiores velocidades dos ventos foram observadas na praia de Almofala, em novembro com um pico de 8,08m/s, e média em torno de 7,2m/s (Figuras 4, 5 e 6).

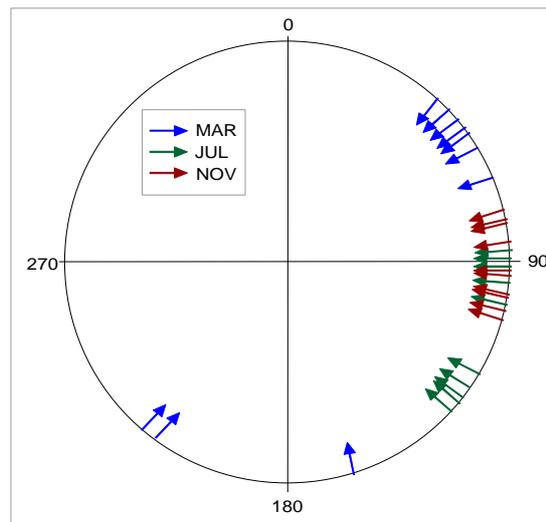


Figura 24. Mapa de direção dos ventos na praia de Almofala medidos em: 19/03/2007 (quadra chuvosa), 14/07/2007 (quadra intermediária) e 24/11/2007 (quadra seca).

Na praia da Almofala a média foi de 3,8 m/s, na quadra chuvosa, representada pelas medidas de março (Figura 25), e obteve os menores valores, com máxima 4,82 m/s, com mínima de 3,05 m/s. O valor máximo na quadra intermediária foi de 6,7 m/s, e o mínimo de 4,55 m/s, e média 5,7 m/s.

A quadra chuvosa da praia da Barreira (Figura 26), representada pelas medidas de março, obteve os menores valores, com máxima 5 m/s, com mínima de 3,5 m/s, e média de 4m/s. O valor máximo na quadra intermediária foi de 7,55 m/s, e o mínimo de 5,45 m/s, com média de 6,2 m/s. Na quadra seca a média foi de 7,1 m/s, com máximo de 7,99 m/s, e mínimo de 6,46 m/s.

Na praia de Torrões o máximo da velocidade dos ventos foi de 7,28 m/s em novembro, a média foi 3,5 m/s. A quadra chuvosa representada pelas medidas de março, obteve os menores valores, com máxima 4,5 m/s (Figura 27), com mínima de 3 m/s, e média de 5,6 m/s. O valor máximo na quadra intermediária foi de 6,55 m/s, e o mínimo de 4,45 m/s. A velocidade máxima na quadra seca foi de 7,28 m/s, e o mínimo de 5,1 m/s, e média de 6 m/s.

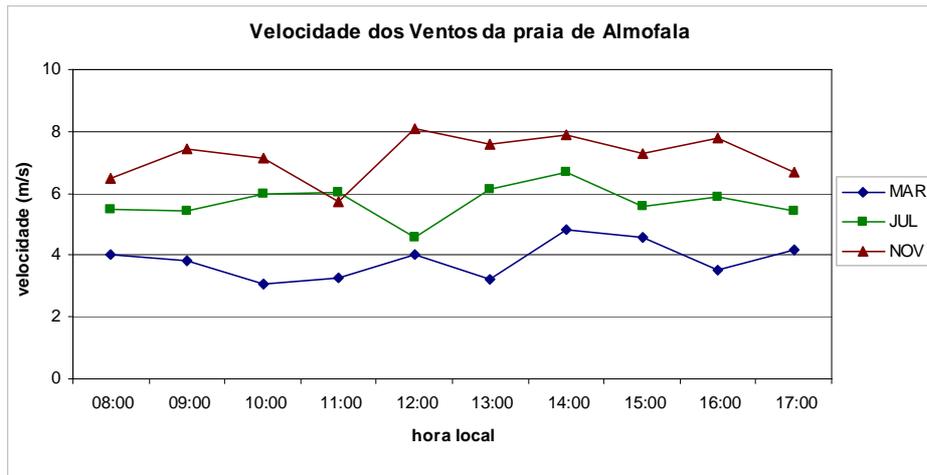


Figura 25. Velocidade sazonal dos ventos na praia de Almofala medidos em: 19/03/2007 (quadra chuvosa), 14/07/2007 (quadra intermediária) e 24/11/2007 (quadra seca).

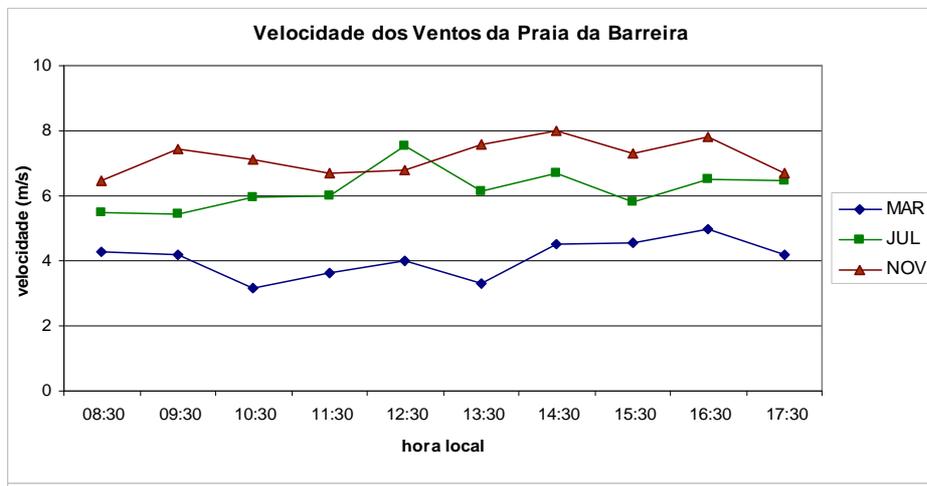


Figura 26. Velocidade sazonal dos ventos na praia da Barreira medidos em: 19/03/2007 (quadra chuvosa), 14/07/2007 (quadra intermediária) e 24/11/2007 (quadra seca).

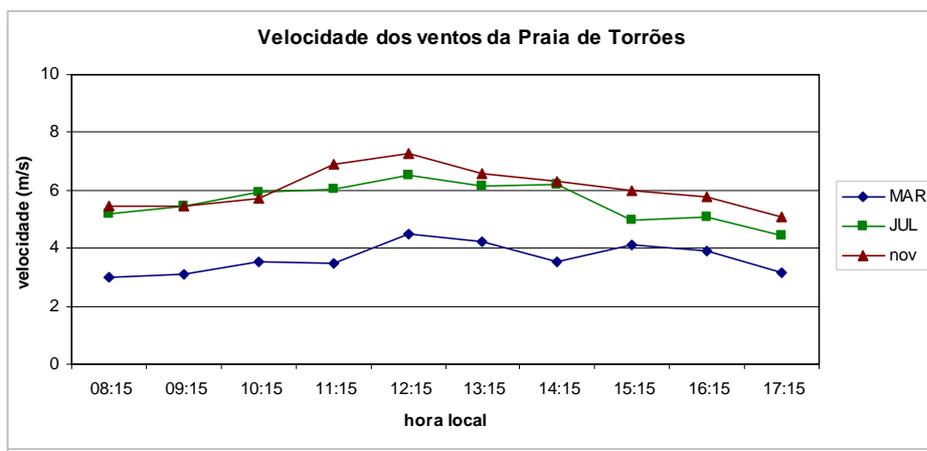


Figura 27. Velocidade sazonal dos ventos na praia de Torrões medidos em: 19/03/2007 (quadra chuvosa), 14/07/2007 (quadra intermediária) e 24/11/2007 (quadra seca).

Os ventos mais constantes foram observados na praia de Torrões com uma tendência crescente da velocidade nas três quadras (2007) das 8:15 às 12:15 (chuvosa), com tendência decrescente entre o horário das 12:15 às 17:15 nas quadras (chuvosa, intermediária, seca).

As medidas de intensidade de ventos obtiveram valores variando nas horas dos dias e sazonalmente na praia de Almafala. Os maiores valores de intensidade, com máxima 8,08 m/s, com mínima de 5,71 m/s aconteceram em novembro (quadra seca) (Figura 25).

### **1.5.7 Aspectos Oceanográficos, Meteorológicos e Hidrodinâmicos na Planície Costeira de Almafala**

As ondas, marés e correntes são os fatores primários na modificação do ambiente praias, além do vento que apresenta uma importante função, como agentes dinâmicos da PCA. Os principais condicionantes da dinâmica costeira são: ventos e transporte eólico de sedimentos, ondas e transporte gerado por ondas, marés, correntes, e descarga fluvial.

#### **1.5.7.1 Marés**

O mês de janeiro é caracterizado por um início de aumento da amplitude de maré (ultrapassando os 3,00 m, numa média máxima histórica) (CNPQ 2003), que normalmente segue até março/abril, e por ressacas no mar geradas por eventos meteorológicos (Pinheiro & Morais 1998).

A PCA é dominada por regime de meso-marés de natureza semi-diurna. Este tipo de maré apresenta as curvas de nível segundo cotas horárias corretas e simétricas, com dois preamares e dois baixamares no período de um dia lunar (24h e 50m). Para o ano de 2007, a maior amplitude de maré registrada foi de 3,1 m e -0,1 m e ocorreu no dia 19/03/2007. Durante os trabalhos de campo, as amplitudes mínima e máxima registradas maré de sizígia de março de 2007, tiveram valores de -0,1 m e 3,1 m.

O Projeto Nordeste (CNPQ 2003) apresentou a quantificação dos processos costeiros do litoral cearense, com dados de amplitude de marés do Porto do Mucuripe para praias de até mais de 200 km (Ex: Praia do Iguape, e Praia do Cumbuco), com bom êxito nos resultados, mesmo com grande distância do porto. Desta forma, admitiu-se que para uma amplitude máxima teórica de um ciclo de meso-maré de até 322 cm, significa que apesar de possíveis erros nas análises teóricas, em função da qualidade dos dados iniciais (cotas horárias), as variações anuais dos valores das componentes harmônicas são insignificantes (CNPQ 2003).

Para uma melhor precisão das análises morfo-sedimentares do ano de 2007 das praias da PCA, foram feitos levantamentos mensais das condições de marés (DHN 2007).

Portanto, na quadra chuvosa iniciou-se a coleta dos pontos da linha de maré baixa sizígia (lua nova) às 10:54h com altura da maré -0,1 m (19/03/2007), concomitante a coleta dos perfis praias. A coleta de pontos da linha de maré alta sizígia (lua nova) iniciou às 17:04h com altura 3.1 m (19/03/2007).

Na quadra intermediária iniciou-se a coleta dos pontos da linha de maré baixa sizígia (lua nova), às 10:38h, maré medindo 0,1 m (14/07/2007), concomitante a coleta dos perfis praias. A coleta de pontos da linha de maré alta sizígia (lua nova) iniciou às 16:53h com maré medindo 2,6 m (14/07/2007).

Na quadra seca iniciou-se a coleta dos pontos da linha de maré baixa sizígia (lua cheia) às 10:02h, com altura 0,2 m (24/11/2007), concomitante a coleta dos perfis praias, com coleta de pontos da linha de maré alta sizígia (lua cheia) iniciando às 16:11h com altura 3,0 m (24/11/2007).

#### 1.5.7.2 Correntes

A velocidade da corrente diminui com a profundidade, e a contribuição da maré na corrente costeira é importante, pois as correntes em direção perpendicular a linha de costa são geradas pelas flutuações de nível do mar (CNPQ 2003).

A corrente longitudinal de Itarema possui uma direção predominante de WNW (paralelo a linha de costa), variando para NNW (Figura 28). A velocidade de correntes no município de Itarema para o ano 2000 variou entre 0,23 e 0,63 m/s, com média de 0,33 m/s na quadra seca, enquanto na quadra chuvosa a média foi ligeiramente inferior (0,25 m/s) com uma maior classe de variação (0,09 a 0,50 m/s) (DHN 2006). Existe uma boa correlação entre velocidade, direção da corrente e a direção do vento.

##### 1.5.7.2.1 Corrente longitudinal

As correntes longitudinais (*longshore currents*) são paralelas à linha de costa, a incidência oblíqua das ondas é um fator responsável pela geração da corrente longitudinal de sedimentos. Essa corrente tem um papel fundamental no modelamento da costa, com ação das ondas e os processos eólicos (Short 1999).

As correntes paralelas à linha de costa de Itarema possuíram valores de velocidade entre 0,23 e 0,30 m/s, sendo que a normal a linha costa possui velocidades entre 0,23 e 0,50 m/s (DHN 2006). No padrão geral da trajetória a profundidades superiores a -10 m, a corrente será sempre paralela à linha de costa.

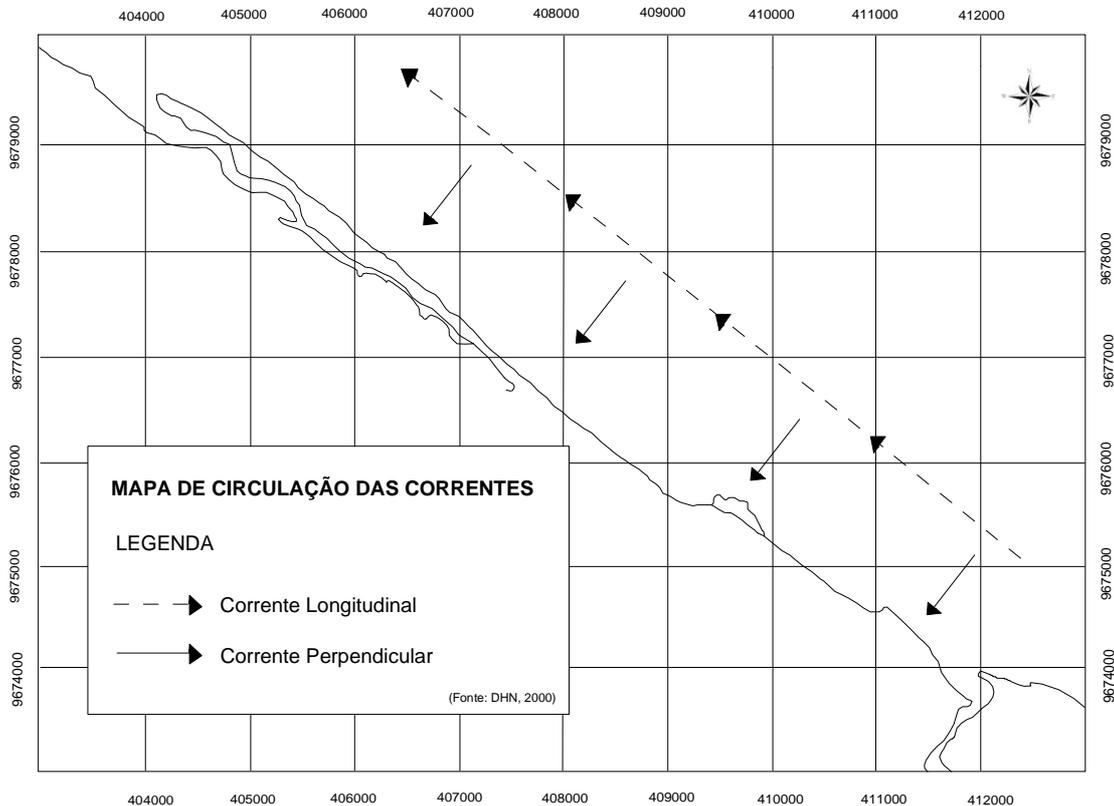


Figura 28. Mapa de circulação das correntes da Planície Costeira de Almofala (Fonte: DHN 2006).

#### 1.5.7.2.2 Corrente de maré

As correntes de maré no litoral de Itarema possuem direção perpendicular à costa, sendo geradas pelas flutuações de nível. Os valores máximos de velocidade das correntes de maré para o ano 2000, são registrados durante o período de sizígia, 5 horas após a preamar, quando atingem 2,6 nós (1,42 m/s), com velocidade mínima 1 hora antes da preamar, não ultrapassando a 2,1 nós. Durante a fase de maré de quadratura, as velocidades diminuem, a velocidade máxima é de 1,44 nós e a mínima de 1,15 nós (DHN 2006).

### 1.5.7.3 Ondas

As ondas são determinantes na geometria e composição das praias, e deriva litorânea, com dissipação na linha de costa, resultante da energia dos ventos (CERC 1984). As ondas são geradas pelo vento, que obedece ao padrão de circulação atmosférica definido pela Célula de Alta Pressão do Atlântico Sul, com características semi-estacionárias. Quanto maior a altura da onda, maior sua energia e sua velocidade. As ondas podem viajar por milhares de quilômetros sem perder altura, o que explica a ocorrência de ondas mesmo em dias sem vento (Rocha *et al.* 2002).

As ondas que chegam a costa de Itarema são do tipo deslizantes (*spilling*) (Figura 29), e suas características se relacionam a velocidade e direção do vento, com um domínio das ondas de ENE, em função da influência dos ventos alísios, seguidas por variações de direções de E, ESE e NE (DHN 2006).

O clima de ondas da PCA (Bittencourt *et al.* 2003) torna as praias expostas, com mínima refração nas ondas (leste), com ângulos de incidência próximos de 45°, que proporcionam uma maior atividade de energia à deriva litorânea, resultando em uma área com características erosivas, ou não-deposicionais na costa.

A altura das ondas no litoral de Almofala varia entre 0,45 m em março, e 0,8 m em novembro (Tabela 2), e as maiores variações ocorreram na praia de Almofala, com uma média geral de 0,52 m. Os períodos variaram de 7,2 a 10,8 segundos, com maior frequência entre 8 e 8,9 segundos. As direções variaram de 18° a 87°, com duas direções preferenciais a de 45°, e em segundo a de 85°.



Figura 29. Ondas do tipo deslizantes na praia da Barreira.

Tabela 02. Valores de período (T) e altura (Hb) das ondas nas praias da Planície Costeira de Almofala (2007).

Praia de Almofala	Março	Julho	Novembro
Hb (m)	0,45	0,65	0,8
T (s)	8,5	7,2	8,8
Direção	45°	75°	45°
Praia da Barreira	Março	Julho	Novembro
Hb (m)	0,5	0,7	0,6
T (s)	8,5	9,1	7,8
Direção	18°	45°	84°
Praia de Torrões	Março	Julho	Novembro
Hb (m)	0,4	0,5	0,55
T (s)	8,2	8,9	10,8
Direção	87°	40°	45°

#### 1.5.7.4 Transporte de sedimentos na planície costeira de Almofala

##### 1.5.7.4.1 Transporte litorâneo de sedimentos

A deriva litorânea é o transporte de sedimentos por ondas e correntes, paralelo à linha de costa (CERC 1984). A taxa de transporte ( $Q$ ) é definida pela taxa de transporte transversal ( $Q_g$ ), gerada por ondas, usada na predição, e pela taxa de transporte de engorda ( $Q_n$ ), para erosão de praia. A taxa de transporte longitudinal depende ainda da Energia de fluxo, que é dada pela taxa de transporte *longshore*, que depende da energia de fluxo na zona de surfe.

As ondas registradas, principalmente do tipo *sea*, possuem direção predominante que refletem a direção dos ventos alísios, são juntamente com as marés os principais agentes do transporte transversal de sedimentos na PCA. As ondas funcionam como agente impulsor, tanto em relação a altura como a direção de aproximação no transporte paralelo da área.

O transporte longitudinal da PCA é unidirecional para noroeste, seguindo o sentido principal da corrente longitudinal (DHN 2006). A deriva litorânea possui grande magnitude, de cerca de 755.000 m<sup>3</sup>/ano (CNPQ 2003).

#### 1.5.7.4.2 Transporte eólico de sedimentos

O conhecimento do transporte eólico de sedimentos nas praias da PCA é importante na contribuição da taxa de transporte de engorda, e compreensão da deriva litorânea. O uso do modelo do CNPQ (2003) nos cálculos de transporte eólico permitiu obter bons resultados para as praias da PCA, através de medições e cálculos dos sedimentos obtidos nas armadilhas de discretização e de integração.

#### Variação vertical do transporte de sedimentos

Os resultados obtidos das armadilhas de discretização mostram que a altura de maior transporte de sedimentos está limitada entre 27 cm, nas condições de vento, produzindo-se a maior parte do transporte nos primeiros 10 cm a partir do solo (Figura 30). Os valores de concentração em toda sua altura somam um peso total de 4,15 gr, acumulando (95%) nos primeiros 10 cm, um peso de cerca de 4,0 gr do total.

As análises granulométricas das frações retidas nas armadilhas de discretização mostram que o tamanho médio dos sedimentos diminui com a altura, passando de 0,252 mm no solo, a 0,175 mm a 13 cm de altura. A fração de sedimentos composta por areia grossa (0,5 mm) é transportada somente por arraste, nas condições de velocidade de vento de (9 m/s).

As armadilhas de integração utilizadas durante os experimentos apresentaram uma capacidade de acumulação em torno de 270 cm<sup>3</sup>, o que corresponde a um peso de sedimento entre 438 gr, em condições de vento de 6,6 m/s, 450 gr em condições de vento de 7,0 m/s, a 480 gr em condições de vento de 6,7 m/s, indicando uma densidade de cerca de 1,7 gr/cm<sup>3</sup>.

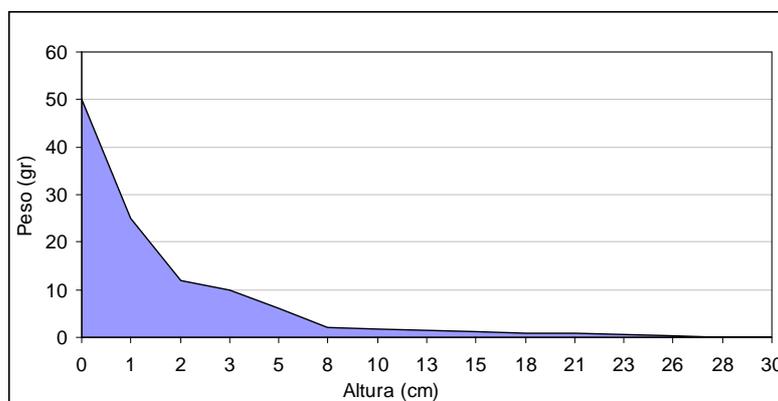


Figura 30. Relação entre perfil vertical de velocidade do vento e concentração de sedimentos de acordo com a altura, na praia de Almofala.

### Taxa de transporte de sedimentos na planície costeira de Almofoala

Os resultados referentes ao ano de 2007 mostraram que o volume transportado foi de 187,1 m<sup>3</sup>/m/ano, com a maior taxa ocorrendo durante o segundo semestre, estiagem na área.

O transporte eólico de sedimentos na PCA é caracterizado por altos valores entre os meses de julho a dezembro (Figura 31), coincidindo com as quadras secas (baixa precipitação), e baixa velocidade de ventos. O pico de transporte ocorreu em outubro, ultrapassando os 25 (m<sup>3</sup>/m/h/mês). Os menores valores de transporte eólico coincidem com a quadra chuvosa, com baixa velocidade de ventos de janeiro a abril, com 5 (m<sup>3</sup>/m/h/mês).

Assim, entre agosto e dezembro, com precipitação zero (Figura 10), tem-se altos valores de transporte eólico com pico em outubro. Em abril, com precipitação alcançando 500, tem-se valor de transporte abaixo de 5 (m<sup>3</sup>/m/h/mês).

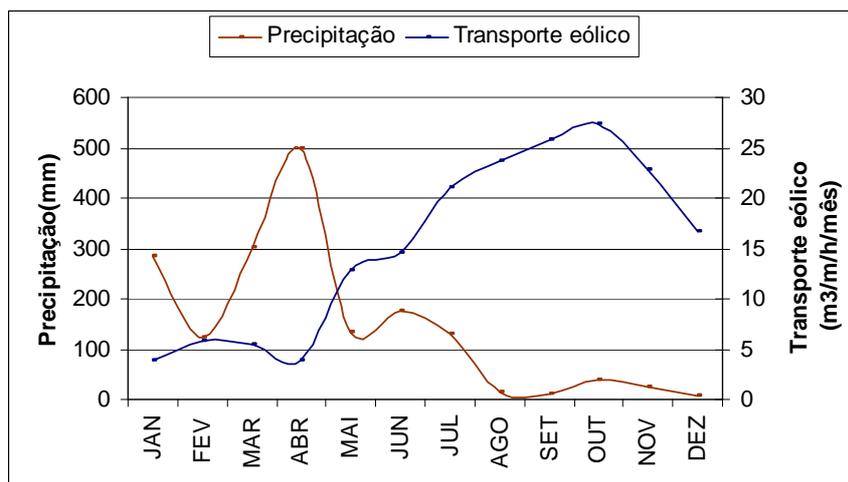


Figura 31. Relação da precipitação e transporte eólico na PCA para o ano de 2007.

### 1.5.8 Variação do Nível do Mar

Os ecossistemas costeiros e marinhos têm a gênese vinculada às mudanças climáticas e as oscilações do nível do mar no Quaternário (Pleistoceno/Holoceno). Reconstituições de antigos níveis marinhos são posições relativas e não absolutas (Sugiuo *et al.* 1985, Sugiuo 1986 e 1999, Raicich 2007, Héquette *et al.* 2008). As oscilações paleoclimáticas influenciaram nas mudanças no nível do mar, com processos de erosão e agradação da linha de costa, e subida eustática (Ferla *et al.* 2007, Héquette *et al.* 2008).

O primeiro nível marinho alto acima do atual no litoral cearense, teve máximo de 8 ±2m (a 123.000 anos A.P.), associado por Meireles (1991) e Meireles & Raventos (2002) ao evento Penúltima Transgressão (Bittencourt *et al.* 2003). Paleofalésias, plataformas de

abrasão do embasamento cristalino e/ou sedimentos da Formação Barreiras, ou em níveis suspensos, indicam um nível médio de 6m acima da maré máxima atual (Meireles 2001).

Na plataforma continental cearense, um nível médio de mar baixo do último máximo glacial de -120 m (22.000 a 14.000 anos A.P. - Glaciação *Wisconsin*, *Würn* ou *Weichselian*), influenciou no desenvolvimento de extensa planície costeira sobre a plataforma continental, com sistemas fluviais meandantes, estuários, terraços marinhos, manguezais, planícies de marés, lagoas, lagoas e campos de dunas (Meireles & Raventos 2002).

O nível médio atual do mar foi alcançado há 7.000 anos A.P. (Figura 32) e um máximo de 5 m acima (5.100 anos A.P), com máximo no episódio Última Transgressão (Bittencourt *et al.* 2003), segundo nível de mar alto definido por Meireles & Raventos (2002). Na PCA, os depósitos quaternários são indicadores de oscilações do nível do mar no Quaternário (Ex: terraço marinho na Lagoa do Mato, e paleomangue na praia de Almofala).

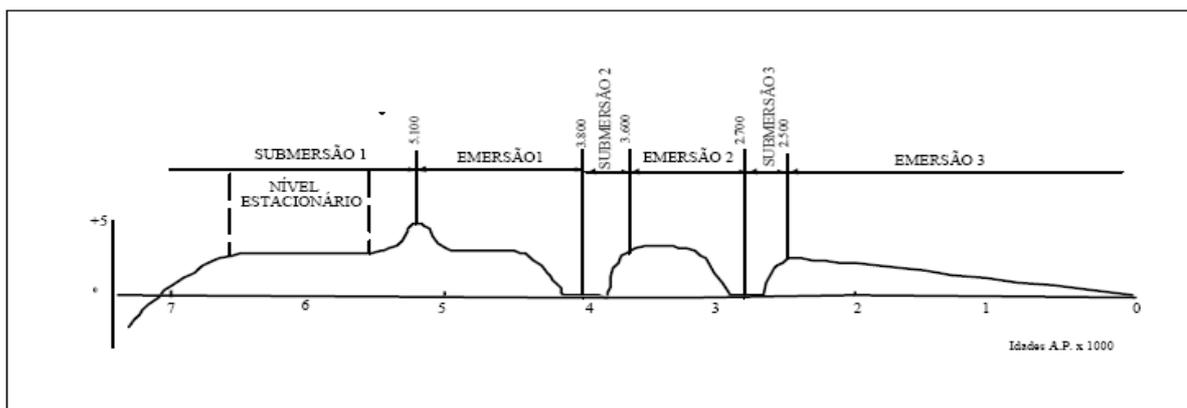


Figura 32. Curva das oscilações do nível do mar para a costa leste brasileira (Suguio, 1985).

### 1.5.9 Fisiografia da plataforma continental interna na PCA

Estudos sobre a plataforma continental rasa da área de estudo são importantes, pois segundo Pereira & El-Robrini (2005), descontinuidades de plataformas rochosas com arranjos topográficos irregulares, recortadas por canais, provavelmente influenciam nos efeitos hidrodinâmicos das ondas e correntes de maré sobre a linha de costa.

A plataforma continental interna da PCA apresenta um relevo de forma suave com poucas irregularidades, realçadas nos trechos onde as rochas do embasamento são mais rasas e afloram na praia, formando pontas, constituídas por sedimentos silici-clásticos (Freire & Moraes 2003, Silva Filho 2005). A declividade é baixa (Figura 33) por causa da inflexão, aumentando ao se aproximar do rio Aracatimirim.

Segundo Silva Filho (2004) a inflexão de Acaraú influencia as tendências nos padrões de drenagem e orientação das estruturas na plataforma continental adjacente, com padrão subparalelo/angular na extremidade noroeste, e entalhes principais no trend NE-SW. Na área submersa da plataforma, a anomalia de entalhes revela um soerguimento, de reativação neotectônica do Lineamento Transbrasiliano (do regime transcorrente com esforço compressivo principal paralelo à margem).

Dois principais grupos de sedimentos existem na plataforma continental interna adjacente a PCA (Freire & Cavalcanti, 1998): siliciclástica ( $\text{CaCO}_3 < 50\%$ ) e carbonática ( $\text{CaCO}_3 > 50\%$ ). Nesta, predominam os sedimentos carbonáticos, em sua maioria areias biodetríticas, e um pequeno “bolsão” de cascalho biodetrítico na altura de Itarema. Areias quartzosas na PCA, e fácies siliciclásticas ocorrem apenas em “bolsões” isolados, em forma de cascalhos quartzosos na altura de Itarema.

Na foz do rio Aracatimirim, tem-se uma predominância de areias quartzosas (fácies siliciclástica) envolvendo grande parte da plataforma continental interna da PCA, que possui baixo gradiente topográfico (Figura 33).

As areias e cascalhos biodetríticos ocorrem na praia da Barreira, e na margem oeste da praia de Almofala (Figura 34) possuem fragmentos de moluscos, briozoários, foraminíferos, algas coralinas e/ou *Halimeda*, com mais de 75% de  $\text{CaCO}_3$ , presença de rodolitos *Lithothamnion*, todos com grau apreciável de retrabalhamento. Possuem grãos subangulares, recobertos por películas de óxido de ferro com areias grossas quartzosas (Freire 1985, Freire & Cavalcanti 1998, Silva Filho 2004).

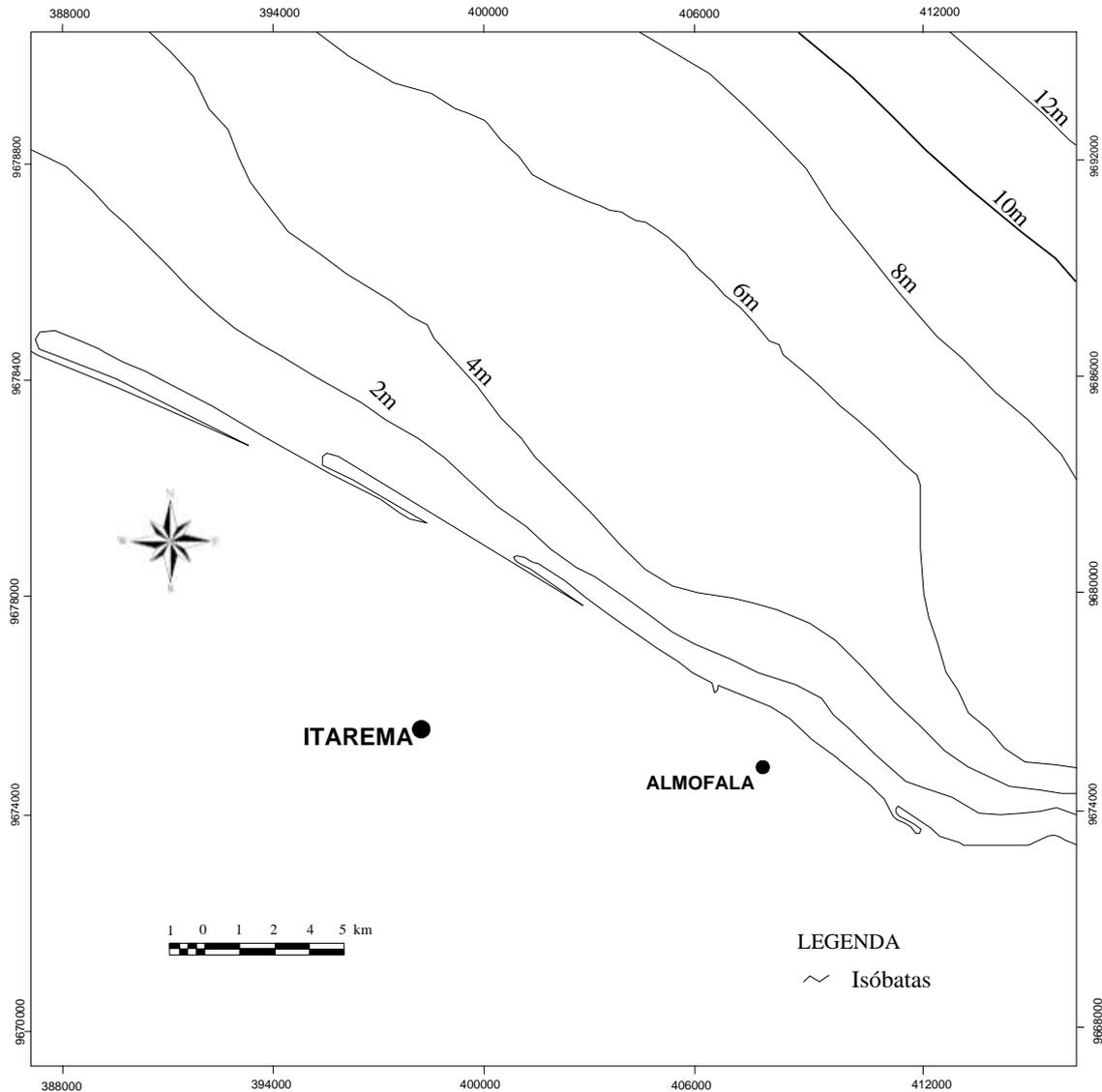


Figura 33. Mapa de Isóbatas da plataforma continental interna da PCA e adjacências (Fonte: Silva Filho 2004).

Ocorrem rodolitos *Lithothamnion* na praia da Barreira (Figura 35) com diâmetro entre 4 e 6cm de cor variada (Figuras 35b, 35c, 35d), e grau elevado de retrabalhamento por ondas, correntes e marés.

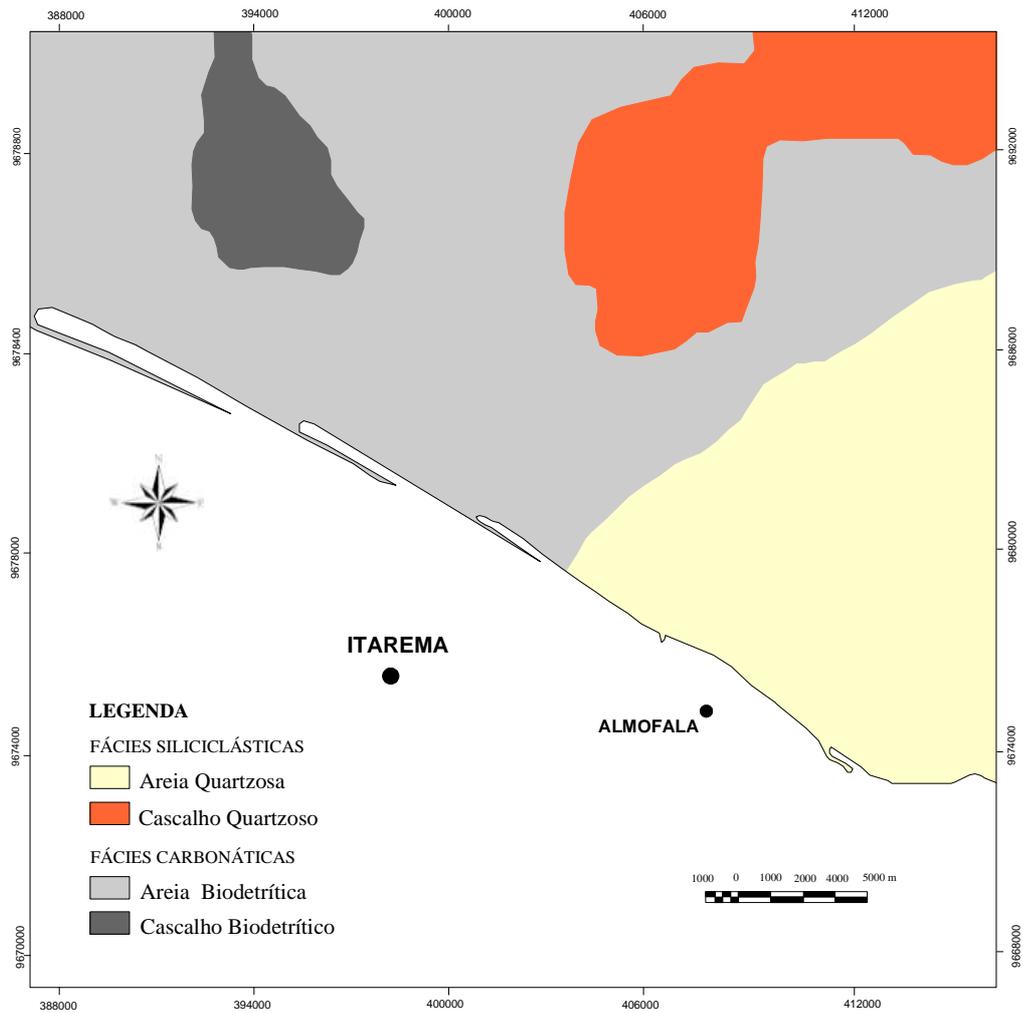


Figura 34. Mapa Faciológico da Plataforma Continental Interna da PCA e adjacências. (Fonte: adaptado de Freire 1985, Freire & Cavalcanti 1998, Silva Filho, 2004).

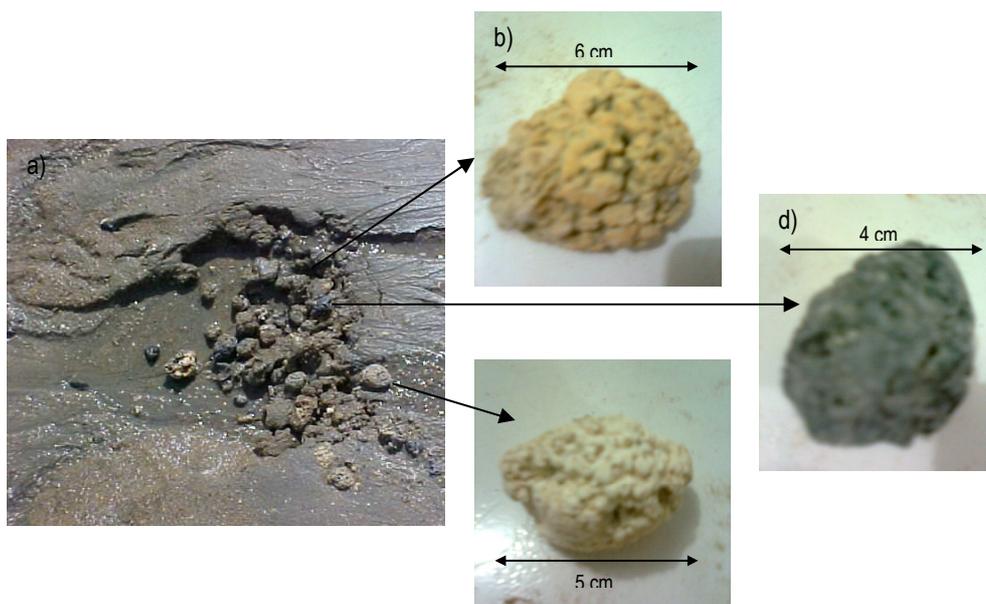


Figura 35. Amostras de rodolitos *Lithothamnion* na praia da Barreira (a), (b), (c) e (d).

## 2 COMPARTIMENTAÇÃO MORFOLÓGICA DA PLANÍCIE COSTEIRA DE ALMOFALA (NW DO CEARÁ - NORDESTE DO BRASIL)<sup>1</sup>

### **Morphological compartmentation of the Almofala Coastal Plain (NW of Ceará - Northeast Brazil)**

#### **Resumo**

A planície costeira de Almofala inclui as praias de Almofala, da Barreira e de Torrões, condicionada por altas temperaturas, pluviometria média de 1172,21mm, velocidade dos ventos de 5,5m/s, regime de meso-marés (1,48m) e altura das ondas de 0,56m. Este artigo tem como objetivos: a análise da compartimentação morfológica da Planície Costeira de Almofala com base em dados de sensores remotos, de topografia e de sedimentos. A metodologia consistiu: (1) coleta de pontos X, Y e Z, e perfis topográficos com DGPS; (2) análise da morfologia em MDT por interpolação de krigagem (3) geração de mapas temáticos (de curvas de nível e de declividade); (4) coleta e análise de sedimentos na PCA; e (5) compartimentação geomorfológica. O MDT, o mapa de declividade, e as análises sedimentológicas possibilitaram uma boa análise do relevo, destacando as suas variações. A Planície Costeira de Almofala apresenta: planalto costeiro ou tabuleiro, recoberto por areias finas a muito finas e plataforma de abrasão; planície aluvial (planície de inundação e terraços); planície estuarina (planície flúvio-lagunar, planície de inter-maré, canais de maré, e delta); e planície arenosa com areias médias (cordões arenosos de dunas e praias atuais, e terraços arenosos).

**Palavras-chaves:** PCA, Ceará, unidades geomorfológicas, mesomaré

#### **Abstract**

The Almofala coastal plain include Almofala, Barreira and Torroes Beachs, conditioned for high temperatures and media raining 1172,21mm, velocity winds 5,5m/s, mesotidal coast, and height waves to 0,56m. The objective was a compartments and morphological analysis to Almofala Coastal Plain based in remote sensing, topographic analysis and sedimentology analysis. The methodology consisted: (1) collection points X,Y, and Z points and topographic profiles; (2) morphological analysis to MDT by interpolation and kriging method (3) generation thematic maps (level curves and sloping); (4) sediments analysis; and (5) geomorphological compatimentation. The MDT and slop map and sedimentologic analysis was possible a better morphology analysis, showing your changes. The Almofala Coastal

---

<sup>1</sup> Artigo submetido na Revista Brasileira de Geociências em 12 de abril de 2011. Autores: Ponciana Freire de Aguiar <sup>1</sup> (UFPA), Prof. Dr. Maamar El-Robrini <sup>2</sup> (UFPA) e Prof. Dr. George Satander Sá Freire <sup>2</sup> (UFC).

Plain having: Plateaus with fine grains to low fine grain; alluvial plain (terraces and floodplain); estuarine plain (lagune plain, ebb-tidal plain, tidal channels and delta); sandy plain (coastal sandy dunes, beaches, sandy terraces).

**Key-words:** PCA, Ceara, morphological units, mesotidal

## 2.1 INTRODUÇÃO

O arranjo geomorfológico das planícies costeiras é entendido através das relações entre as formas (Summerfield 1991) e os processos atuantes (erosão, deposição e transporte de sedimentos) no continente (geologia, hidrografia) e na linha de costa (ondas, marés, correntes), originando, modificando e recriando as feições (Klein *et al.* 2009).

As unidades geomorfológicas da planície costeira de Almofoala (PCA) foram baseadas nas formas, características deposicionais, de sedimentos, e processos dominantes atuais e históricos, além de perfilagem topográfica, modelagem de terreno e sensoriamento remoto, segundo Summerfield (1991); Davis Junior (1983, 1992); Souza Filho & El-Robrini (2000); Souza Filho (2000a,b); Silva Filho (2004); Costa & Souza Filho (2007); Callaghan *et al.* (2009); Yoshikawa *et al.* (2010), entre outros.

A análise do relevo costeiro envolve diversas linhas de pesquisa: análise comparativa entre métodos de interpolação para construção de modelos numéricos do terreno (Kozciak 1999); predição de propriedades do solo, utilizando dados digitais de elevação (Lagacherie & Voltz 2000); avaliação e aplicação de sensores remotos no estudo de ambientes costeiros de Bragança (Souza Filho 2000); geomorfologia da zona costeira de Bragança (Souza Filho & El-Robrini 2000); RADARSAT-1 e Landsat-5 TM no mapeamento geomorfológico (Souza Filho & Paradella 2005); modelagem numérica de terreno (Felgueiras & Câmara 2006), etc.

Atualmente os estudos morfológicos enfatizam: a utilização de modelos digitais de elevação (MDE) na representação do relevo submerso e emerso na zona costeira amazônica (Costa & Souza Filho 2007); a utilização de imagem de alta resolução espacial para o mapeamento de Monte Belo do Sul - RS (Farina *et al.* 2007); a quantificação dos processos de erosão nas planícies costeiras (Callaghan *et al.* 2009); e a análise geomorfológica de pântanos via sensoriamento remoto multitemporal e multiespectral com LIDAR e SIG (Millette *et al.* 2010).

Alguns trabalhos foram realizados na PCA: estudo das unidades morfoestruturais do estado do Ceará (Souza 1989); evolução tectono-sedimentar e o *habitat* do óleo da Bacia do

Ceará (Costa *et al.* 1990); Bacia do Ceará (Beltrami *et al.* 1994) zoneamento geoambiental do Ceará (Souza, 1994); evolução geomorfológica da zona costeira cearense (Sales 2002); atlas de geologia e recursos minerais do Ceará (CPRM 2003); domínios morfoestruturais da plataforma continental do estado do Ceará (Silva Filho 2004); e o mapeamento das unidades geoambientais da zona costeira cearense (Maia & Cavalcante 2005); entre outros.

Assim o sensoriamento remoto e o MDT são ferramentas essenciais em mapeamentos geomorfológicos (Jensen 1998, Barreto Neto *et al.* 1999, Câmara & Medeiros 2000) por permitir tratar as variáveis de forma rápida e integrada em Banco de Dados Geográficos (BDG's). Os elementos de interpretação visual utilizados nas imagens (Jensen 1998, Câmara & Medeiros 2000, Florenzano 2002) foram: tonalidade, cor, textura, localidade (de certos alvos), forma (regular, irregular), objeto, posição (x, y) e a altura (z).

Este artigo revela os diversos compartimentos morfológicos da área com base nos objetivos: caracterizar e compartimentar a morfológica da PCA a partir de sensores remotos, MDT, topografia, análise de sedimentos, e mapeamentos (curvas de nível e declividade). Assim, foram identificadas duas grandes unidades principais: Planalto Costeiro e Planície costeira com subunidades associadas.

### **2.1.1 Localização e caracterização geográfica na Planície Costeira de Almofala**

A PCA inclui a praia de Almofala e adjacências, com 8km de costa, localizada no município de Itarema, costa oeste do estado do Ceará (Nordeste, Brasil), (coordenadas UTM: X1: 403000 E, 9673000N, X2: 412000E, 9679000N) (Figura 1).

A PCA possui um empilhamento estratigráfico ao qual afloram duas grandes unidades geológicas: a Formação Barreiras do Neógeno (Mioceno/Plioceno) que se estendeu ao Quaternário (Pleistoceno); os Depósitos Quaternários (Holoceno) (Beltrami *et al.* 1994, CPRM 2003). Instalada numa margem passiva, com uma falha inferida (NE-SW) na área continental, e falhas normais (E-W) na plataforma continental interna (Silva Filho 2004).

Segundo Souza (1989, 1994) e IBGE (2009), a PCA insere-se no Domínio Morfoclimático da Caatinga, das Depressões intermontanas e interplanálticas semi-áridas. O Domínio Morfoestrutural da área inclui: os Sedimentos Inconsolidados (Planalto Costeiro) com sequências da Formação Barreiras do Neógeno (Mioceno/Plioceno); e os Depósitos Quaternários (Holoceno) sedimentares (Planície Costeira); que se sobrepõem ao Embasamento Cristalino (Pré-Cambriano), este não aflora na PCA.

O relevo da PCA, de acordo com Souza (1989, 1994) é sustentado por duas unidades geomorfológicas distintas:

(a) O Planalto Costeiro, ou Glacis Litorâneos (Souza 1989) inclui os Tabuleiros Litorâneos de Modelado de Aplanamento com uma superfície pediplanada, constituída pelos terraços marinhos (formas de relevo de topo plano), elaboradas em sedimentos inconsolidados e conglomerados, limitadas por escarpas (Sales 2002, Maia & Cavalcante 2005); os tabuleiros litorâneos apresentam altitudes relativamente baixas, as maiores elevações da área (+30m) com uma área de 8.066.611m<sup>2</sup>;

(b) A Planície Costeira, com uma área de 25.271.014 m<sup>2</sup>, apresenta-se com vários compartimentos (Souza 1989, 1994, Sales 2002): planícies aluviais (terraços, planície de inundação), planícies estuarinas (paleomangues, deltas, planícies lagunares com interflúvios e canais de maré), e planícies arenosas (dunas, eolianitos, praias, paleomangues).

A PCA é recortada pelo rio Aracatimirim, e o maior corpo d'água é o Lagamar do Sargento, pertencentes a sub-bacia da Bacia Hidrográfica Litorânea do Ceará. A drenagem tem um padrão dendrítico e paralelo e possui córregos como o do Lamarão e o do Paná, com nascentes na Formação Barreiras e nos Depósitos Quaternários.

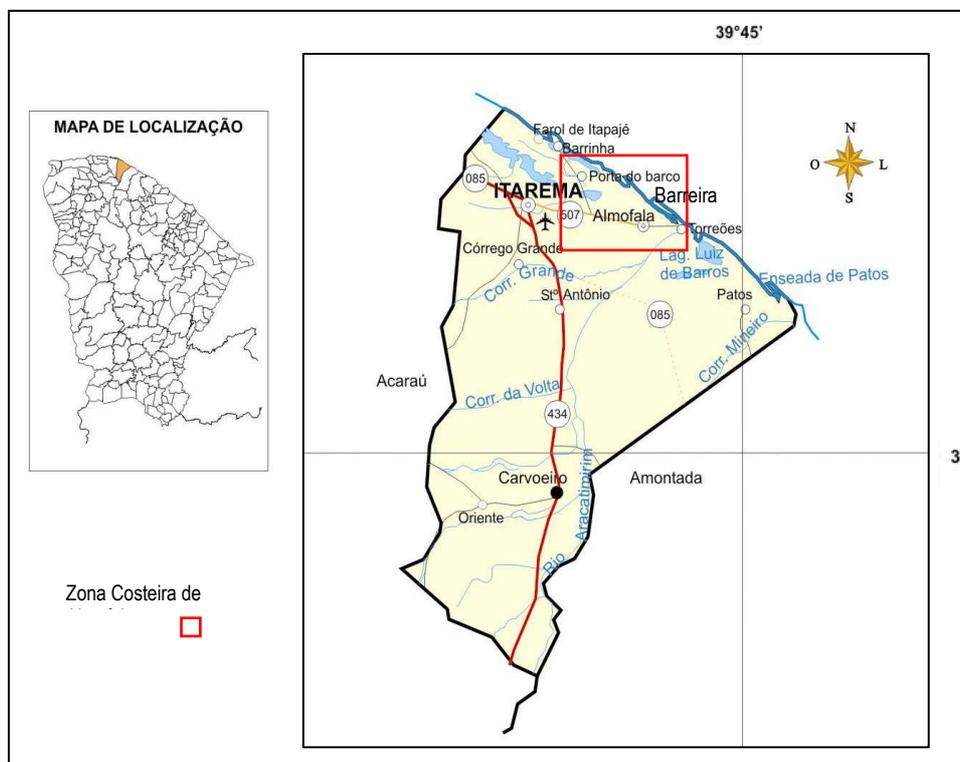


Figura 01. Mapa de localização da Planície Costeira de Almofala (quadro vermelho).

O clima da PCA caracteriza-se por temperaturas que excedem 25°C, quentes, e pluviometria variando em média entre 800 mm à 1600 mm, classificado como tropical chuvoso e quente (Ayoade 1986). Possui uma circulação leste (alísios), com ventos de direção preferencial de E (leste) e velocidade média de 5,5m/s (FUNCEME 2010).

## 2.2 METODOLOGIA

A metodologia constituiu em um estudo descritivo e explicativo, com identificação e quantificação das variáveis geomorfológicas, e reavaliação sistemática da bibliografia e documentação pré-existente.

Foram adquiridos documentos cartográficos da área: cartas topográficas da SUDENE de 1979 (Folha SA 24); mapa Morfoestrutural do Ceará na escala de 1:500.000 (CPRM 2003); imagens de satélite Quickbird (2004) e imagens do satélite Landsat (2006).

Duas campanhas de campo foram realizadas na PCA para o mapeamento das unidades geomorfológicas: (1) 10 a 15/02/2007 - reconhecimento de áreas, identificação de unidades e subunidades geomorfológicas, e coleta de pontos e perfis topográficos com DGPS; (2) 10 e 11/05/2008 - correção dos dados do mapa geomorfológico.

### 2.2.1 Amostragem dos dados topográficos

Para a confecção do Modelo Digital de Terreno (MDT) com dados espaciais vetoriais, seguiu-se a seguinte sequência: aquisição de amostras (coordenadas e altitude); geração do modelo ou interpolação; e a aplicações dos dados. A amostragem (X,Y e Z) utilizada foi a semi-regular que preserva a regularidade (em uma direção pré-estabelecida) na direção x ou y, não necessariamente nas duas ao mesmo tempo.

A amostragem por perfis com coleta de dados com DGPS iniciou em laboratório, seguida de campo na área e tratamento dos dados em laboratório. O método utilizado “*in situ*” de perfilagem foi o *stop*” and “*go*”.

Foram realizados 28 perfis transversais a cada 500 m na PCA, e 200 m nos pontos. Foram realizados 5 perfis aleatórios nas praias de Almofala, da Barreira e de Torrões. Para evidenciar um sistema de duna e a praia de Almofala, foram feitos 5 perfis com distância de 5 m, e 2 m nos pontos, e realização de MDT.

A acurácia de 0,5 cm dos dados de alta precisão do DGPS foi muito boa na realização de perfis, resultando em ótima metodologia. Dos 1465 pontos aleatórios coletados pelo par de

DGPS, somente 80 apresentaram inconsistência, num percentual de erro de apenas 5,5%. Os pontos obtiveram uma variância medindo 53.98%, enquanto o desvio padrão mediu  $\pm 5.9$ .

## **2.2.2 Procedimentos laboratoriais**

### **2.2.2.1 Modelagem Digital de Terreno (MDT) e geração de mapas temáticos**

Foi gerado um MDT da PCA, o qual para a interpolação dos nós do grid, o método utilizado foi o da krigagem, baseado na investigação do comportamento das “variáveis regionalizadas” (Silva Filho 2004, Baptista *et al.* 2006).

Concluído o refinamento da grade original, iniciou-se o processo de elaboração dos MDT's e do mapa de declividade, no aplicativo Surfer 8. Foram adotados os valores sugeridos pela Embrapa (1979) com intervalos de: 0-3% (relevo plano); 3-8% (relevo suave ondulado); 8-20% (relevo ondulado); 20-45% (fortemente ondulado); e >45% (relevo montanhoso).

Foi confeccionado um MDT de praia e dunas frontais da Praia de Almofala, através da criação de um grid, com os dados de altitude coletados e confecção do modelo em laboratório, com uso do aplicativo Surfer 8.0.

### **2.2.2.2 Mapeamento geomorfológico na Planície Costeira de Almofala**

Os componentes temáticos do Mapa Geomorfológico (Figura 2), foram elaborados a partir de imagens de satélite Quick Bird (2004), e da interpretação visual das imagens do satélite Landsat 5 (TM) (2006), por observação das variações texturais, da homogeneidade dos temas e contatos morfológicos, para a individualização das unidades (Maia & Cavalcante 2005, Sales 2002).

As unidades geomorfológicas foram digitalizadas e mapeadas na escala de 1:50.000 e confirmação em campo. As imagens Quickbird foram utilizadas na ortorretificação das imagens Landsat no aplicativo PCI 9.1. Em seguida as imagens foram salvas no formato \*.pix, importadas no Aplicativo ArcGis 8.3, e feita a interpretação visual da composição colorida das bandas 453, seguida da 457 (RGB) do satélite Landsat (2006), método bom para análise da morfologia (IBGE 2009).

A altura utilizada na ortorretificação das imagens Landsat foi a dos perfis coletados em campo com DGPS. O erro residual do registro foi de 0,789 pixel.

A compartimentação geomorfológica da PCA (Figura 2) teve como base a integração dos planos de informação em um BDG: (1) interpretação de mapas da bibliografia citada; (2) MDT, mapa de curvas de nível, e de declividade. Foram utilizados os aplicativos Surfer8 e Arcview 8.9.

### 2.3 ANÁLISE DO MODELO DIGITAL DE TERRENO (MDT) NA PCA

O MDT da PCA evidenciou os principais elementos de relevo da área. Observam-se os tabuleiros litorâneos com +30 m de altitude (Figuras 2 e 3). As dunas fixas com mais de 20m de altitude seguem o sentido da parte interna da PCA (até 2 km) (Figura 3). As altitudes mais baixas ocorrem na planície estuarina do Aracatimirim com cerca de 0,50 m. A planície aluvial do córrego Lamarão inicia em altitudes de cerca de 18 m recortando os tabuleiros litorâneos, desaguando no rio principal com altitude de 2 m, a leste da área de pesquisa.

A planície lagunar do Lagamar do Sargento (Figura 5) apresenta altitudes inferiores a 5 m (Figura 2 e 3). A planície estuarina da praia da Barreira formou-se pelo barramento de canais de marés e variam de altitudes entre 3 e 5 m.

O contato entre as dunas das praias de Almofala e de Torrões (Figura 3) é marcado por uma quebra de relevo abrupta, com altas declividades representando as escarpas de praia formadas nos eolianitos que existem ao longo destas duas praias, que chegam a ultrapassar os 15 m de altitude.

A plataforma continental interna da PCA possui baixas profundidades, com valores até -10 m. Próximo a linha de costa as menores profundidades ocorrem na foz do rio Aracatimirim, nas calhas do delta do estuário, variando de 0,50 a -2 m, entre os bancos arenosos (Figuras 2 e 3).

Maia & Cavalcante (2005) e Sales (2002) estudaram corredores eólicos em diversas praias cearenses: de Beberibe e do Futuro em Fortaleza, e de Paracuru e de Pecém. Nas praias de Almofala e de Torrões, os corredores de deflação eólica no MDT (Figura 3) apresentam um relevo baixo (3 m), esses valores seguem a parte interna da PCA, nos eolianitos e dunas fixas, relacionado a um corredor de circulação dos ventos alísios.

A acurácia final das posições do DGPS variou de zero a 5 cm. A acurácia de mapas altimétricos gerados com dados do DGPS, variou de 5 cm a 2 m, sendo consideradas boas acurácias se comparadas a levantamentos realizados por métodos convencionais.

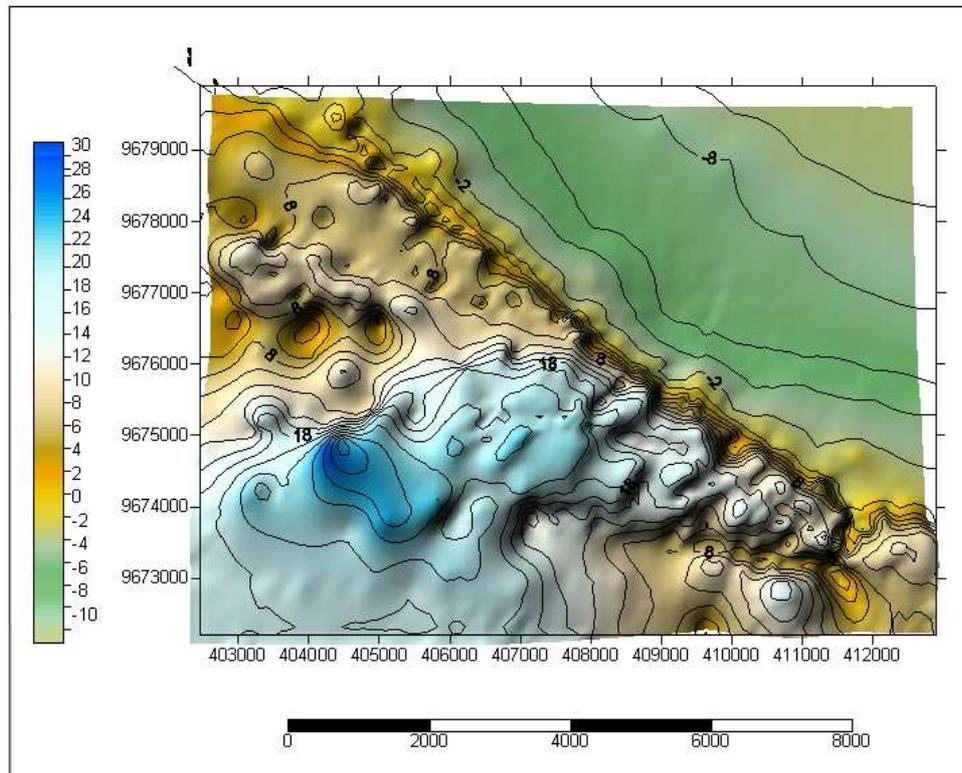


Figura 2. Modelo Digital de Terreno integrado a Batimetria e topografia da Planície Costeira de Almofala.

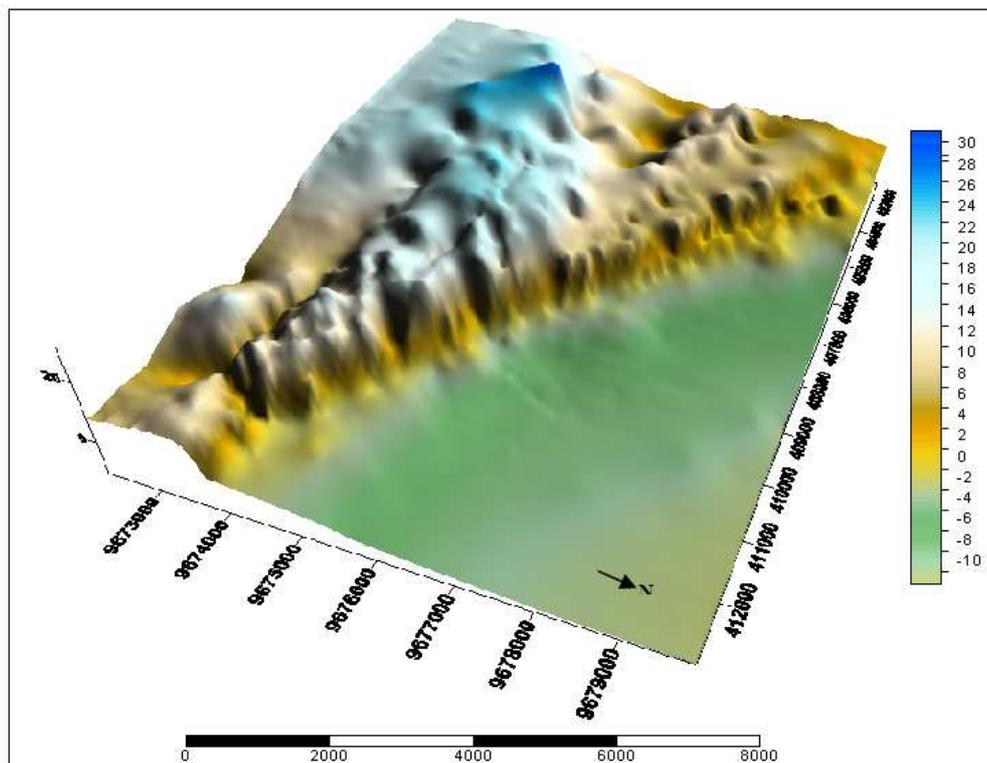


Figura 3. Modelo Digital de Elevação da Planície Costeira de Almofala.

A maior parte da PCA possui relevo plano (classe de 0 – 3%) (Mapa de Declividade – Figura 4), incluindo: grande parte dos tabuleiros litorâneos (Figura 3), quase toda a planície estuarina da praia da Barreira, e pequenas áreas da planície arenosa.

O relevo suavemente ondulado (3 – 8%) localiza-se em: grande parte das dunas fixas, parte dos tabuleiros litorâneos, e a planície lagunar do Sargento (Figuras 4 e 5). O relevo ondulado (8 – 20%) localiza-se numa pequena área de dunas, e pequenas áreas distribuídas nas escarpas de praia, escarpas de dunas, e margens do córrego Lamarão.

O relevo fortemente ondulado (20 – 45%) está localizado no contato entre a praia e os eolianitos, formam escarpas de praia e dunas com morfologia bem preservada. As praias de Almofala, da Barreira de Torrões possuem relevo plano (0-3%).

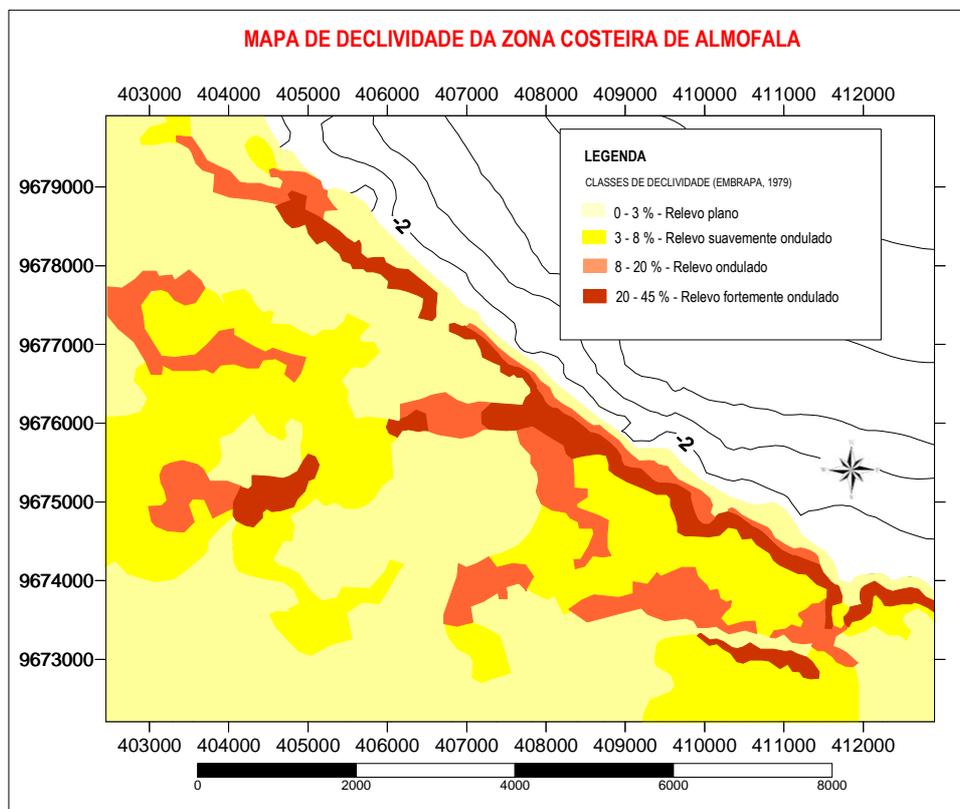


Figura 4. Mapa de Declividade da Planície Costeira de Almofala.

## 2.4 COMPARTIMENTAÇÃO GEOMORFOLÓGICA NA PCA

Duas grandes unidades geomorfológicas foram identificadas na PCA (Figura 5): o Planalto Costeiro com uma superfície de 8.066.611m<sup>2</sup>, cerca de 24,22% da área total; e a Planície Costeira com área de 25.271.014 m<sup>2</sup>, cerca de 75,78% da área.

TABELA 1. Unidades e Subunidades geomorfológicas da PCA.

<b>UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS</b>	<b>Subunidades</b>	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	<b>%</b>
<b>PLANALTO COSTEIRO</b>		<b>8066611</b>	<b>24,22</b>
	Tabuleiros Costeiros	8031957	24,11
	Plataforma de Abrasão	34654	0,1
<b>PLANÍCIE COSTEIRA</b>		<b>25271014</b>	<b>75,78</b>
Planície Aluvial		944912	2,83
Planície Estuarina	planície de intermaré	5782520	17,34
	planície lagunar	1449466	4,35
	delta	66696	0,2
Planície Arenosa	dunas fixas/eolianitos	13879382	41,63
	dunas móveis	1463971	4,39
	praia	837031	2,51
Calhas estuarinas/Lagunas		847036	2,54
<b>Total da Unidades</b>		<b>33337625</b>	<b>100</b>

A PCA possui duas unidades geomorfológicas que ocorrem em toda a costa cearense segundo Souza (1989, 1994), Sales (2002) e IBGE (2009): Planalto Costeiro com tabuleiros litorâneos; e a Planície Costeira.

No litoral norte do Brasil, como na Ilha de Marajó, predominam os Planaltos Rebaixados da Amazônia (França & Souza Filho 2003) com altitudes de até 20 m. O Planalto Costeiro cearense pode formar superfícies pediplanadas que ultrapassam os 100 m de altitude, elaboradas em sedimentos inconsolidados e conglomerados, limitadas por escarpas (Souza 1989, Sales 2002, Maia & Cavalcante 2005). Na PCA os tabuleiros litorâneos apresentam altitudes que ultrapassam pouco mais de 30m de altitude.

A Planície Costeira na Ilha de Marajó litoral, dominada por regime de macro-maré (>3.5m) e alta pluviometria, formam-se extensas planícies aluviais, estuarinas, e arenosas, por processos fluviais e marinhos dominantes. Na Planície Costeira de Almofala em regime de meso-maré (1.48m) e baixa precipitação, nota-se a formação de planícies aluviais (terraços, planície de inundação), planícies estuarinas (paleomangues, deltas, planícies lagunares, e planície de inter-maré), e planícies arenosas (dunas e eolianitos - com altitudes maiores que 20m, praias, paleomangues), por predomínio de agentes como ondas, correntes e ventos, a exemplo das praias de Arpoeira, e Ponta Grossa, Ceará (Souza, 1989, 1994, Sales 2002).

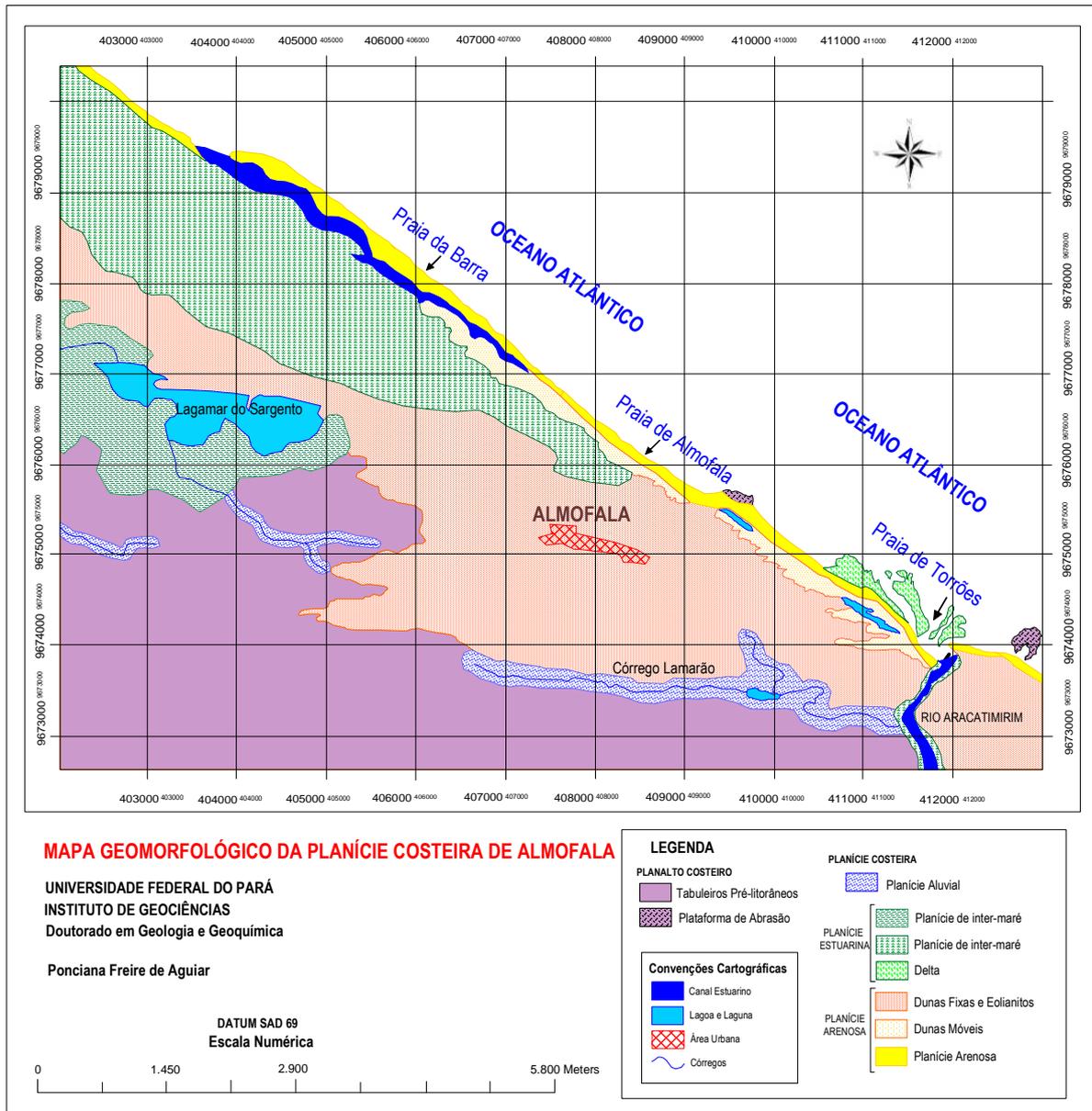


Figura 5. Mapa Geomorfológico da Planície Costeira de Almofala.

#### 2.4.1 Planalto costeiro

O Planalto Costeiro inclui os Glacis Pré-litorâneos (Souza 1989, 1994, IBGE 2009), com modelado de superfície de aplanção, com feições de topo plano (tabuleiros), com altimetria que varia de 10 a 35 m., testemunhando os depósitos da Formação Barreiras, (Figura 6a). Possui cobertura detrítica, ocorrendo em zonas tabuliformes periféricas às Depressões Sertanejas, e em contato com o litoral.

O Planalto Costeiro da PCA possui uma superfície de 8.066.611m<sup>2</sup> (24,22%), e é recoberto por areia fina (5,9%) a areia muito fina (2,9%).

Nas praias de Almofala e de Torrões, ocorrem plataformas de abrasão, esculpidas nos sedimentos da Formação Barreiras, isoladas nas zonas de estirâncio, entre as escarpas de praia e a linha de costa, e sofrem processo de erosão por solapeamento (Freire 1998, Freire e Cavalcanti 1998, Freire & Moraes 2003, Silva Filho 2004).

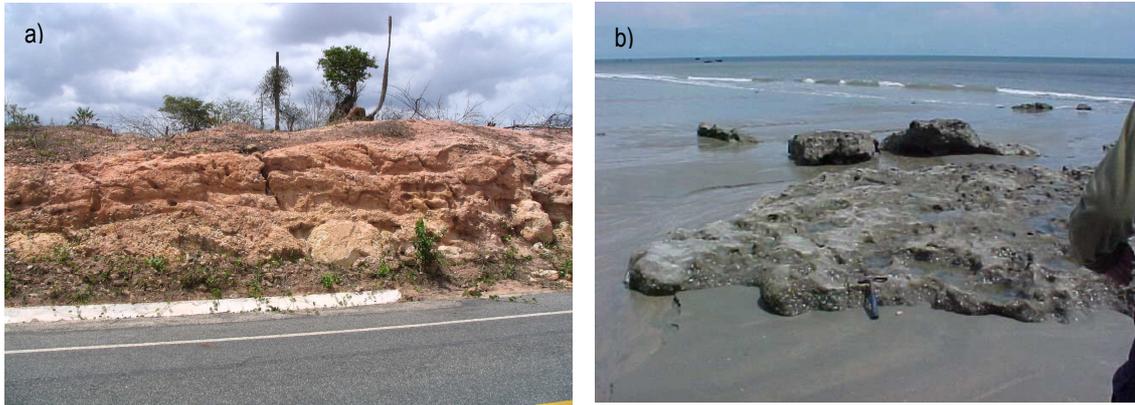


Figura 6. Afloramento da Formação Barreiras, Planalto Costeiro na estrada de Itarema, com superfície plana (a); Plataforma de abrasão da Formação Barreiras na praia de Almofala (b).

A Plataforma de Abrasão (Figura 6b) está sobreposta ao cristalino maciço (Pré-cambriano), e ocorre em toda a extensão da PCA, na linha de costa nas coordenadas: (1) X=409500 e Y=9674000 na Praia de Almofala, (2) X= 412500E e Y= 9675500N na Praia de Torrões. A plataforma de abrasão ocupa uma área de 34.654 m<sup>2</sup>, cerca de 0,1% da área total.

#### 2.4.2 Planície Costeira

A Planície Costeira representa a maior parte da área com 25.271.014 m<sup>2</sup> (75,78% da área total) (Tabela 1, Figura 5), inclui: a planície aluvial (2,83% da área total); a planície estuarina (21,89%) com planície flúvio-lagunar, planície de inter-maré, e delta; e a planície arenosa (48,53% da área) constituída por dunas fixas e eolianitos, dunas móveis, praias e cordões litorâneos.

#### 2.4.2.1 Planície Aluvial

A planície aluvial da PCA é uma área plana de acumulação fluvial sujeita as inundações periódicas (Souza 1989, 1994, IBGE 2009), inclui às planícies de inundação e os terraços de várzeas atuais. As planícies aluviais da PCA somam uma área de 944.912m<sup>2</sup> e bordejam o rio Aracatimirim, e os córregos do Lamarão, e do Paná, constituídas por areias finas (8,8%) e areia média (2,9%).

Os depósitos de inundação constituem segundo Suguio (1999) os níveis mais baixos existentes no plano aluvial, correspondendo aos antigos depósitos de enchentes, enquanto os terraços de várzea são designados por possuir material colúvio-aluvionar que recobre estes níveis formando rampas.

#### 2.4.2.2 Planície estuarina

A Planície Estuarina também chamada de planície flúvio-marinha de acordo com Souza (1989, 1994) e IBGE (2009) é uma área plana resultante da combinação de processos de acumulação fluvial e marinha, sujeita as inundações periódicas, incluindo: planície flúvio-lagunar, a planície de intermaré (manguezais), canais de marés, e deltas. Ocorrem nas baixadas litorâneas, próximo às desembocaduras fluviais e canais de marés.

##### 2.4.2.2.1 Planície flúvio-lagunar

A planície flúvio-lagunar é uma área plana resultante da combinação de processos de acumulação fluvial e marinha de acordo com Souza (1989, 1994), e IBGE (2009), podendo comportar canais anastomosados, paleomeandros (*oxbow lakes*) e diques marginais, em setores sob o efeito de rios/córregos e de inundações periódicas (influência das marés) e sazonais (de janeiro a abril).

A planície flúvio-lagunar (Lagamar do Sargento) recobre uma área de 1.449.466m<sup>2</sup> (4,35% do total da área) na parte interna oeste da PCA. Esta feição é constituída por terrenos de baixa altitude (menores que 5m), constituída por areia média (8,8%) e areia fina (2,9%).

#### 2.4.2.2.2 Planície de inter-maré

A planície de inter-maré da PCA (Figura 5) ocupa uma área de 5.782.520 m<sup>2</sup> (17,34% da área total) que inclui adjacências da praia da Barreira, e as margens do estuário do rio Aracatimir (3,73%). Possui influência flúvio-marinha e é recoberta por mangue e constituída de silte grosso (8,8%) e areia muito fina (2,9%) (Figura 7a,c).

Extensas áreas com mangue soterradas por dunas, ocorrem na margem direita do estuário do rio Aracatimir. Na praia de Almofala afloram paleo-mangues nos sedimentos praias (UTM 9679760N e 407870E) (Figura 7b), parte cobertos por cordões arenosos.



Figura 7. Planície Estuarina do rio Aracatimir (a); Paleo-Mangue na praia de Almofala (b); e Planície Estuarina na praia da Barreira (c).

#### 2.4.2.2.3 Delta

O delta ocorre na desembocadura do rio Aracatimir, com a presença de três ou mais braços rasos, separados por bancos arenosos de foz de canal, originados por sedimentação, que ficam expostos na maré baixa, em regime de meso-maré (1,48 m). O delta possui uma área de 66.696 m<sup>2</sup> (0,2% da área total).

#### 2.4.2.3 Planície Arenosa

A planície arenosa corresponde a uma área plana de 1.463.971 m<sup>2</sup>, resultante de acumulação de sedimentos marinhos, que comporta dunas, restingas, praias, cordões litorâneos e ocorrem nas baixadas costeiras sob a influência dos processos de agredação marinhos por diversos agentes climáticos e hidrodinâmicos, e seus fatores, vento, ondas, correntes e marés (Souza 1989, 1994, França & Souza Filho 2006, Li *et al.* 2008, IBGE 2009).

### 2.4.2.3.1 Cordões Arenosos de dunas

Os cordões arenosos de dunas (15,3 Km<sup>2</sup>) na PCA compreendem uma superfície de acumulação com depósitos arenosos ondulados, gerados por processos eólicos, com cristas que podem ultrapassar os 30 m de altura. Na PCA os ventos carregam os sedimentos marinhos da zona de estirâncio, por processos de saltação, arrasto, e deposição para a zona de pós-praia, até a parte interna (2 km), como na costa sudeste do Brasil (Bigarella *et al.* 2005).

Esses cordões arenosos apresentam estratificações plano-paralelas e cruzadas (Souza 1989, 1994, Maia & Cavalcante 2005, IBGE 2009). Possuem formas (barcanas, parabólicas, transversais, longitudinais e reversas) que variam em função do estoque de sedimentos costeiros, processos eólicos e direção do vento (Bigarella *et al.* 2005).

As dunas fixas da PCA ocupam a maior área da PCA com 13879382 m<sup>2</sup> (41,62%) da área total. As dunas móveis ocupam uma área de 1463971 m<sup>2</sup> (4,39%). As dunas móveis e os eolianitos são formados por areia fina (14,7%) a areia muito fina (8,8%).

Os lençóis dunares (*sand sheet*) na PCA são formados por dunas transgressivas com formas transversais sem face de deslizamento, o regime de vento predominante é unimodal de quadrante E, com feições planas pouco onduladas e terminações parabólicas. As dunas longitudinais ou lineares estão dispostas paralelas a direção do vento principal em formas alongadas (Figura 8), pelo vento de direção preferencial E, e por ventos de ESSE, em regime de vento unimodal.



Figura 8. As setas amarelas indicam as dunas longitudinais alongando-se para a parte interna da praia de Almofala.

As dunas parabólicas possuem formas em “U” ou “V”, dispostas na PCA com o lado côncavo orientado para barlavento da direção preferencial de transporte eólico de seus sedimentos, estando distribuídas sobre a planície de deflação por ventos de SE.

As dunas transversais da PCA são originadas por ventos unidirecionais com a face de deslizamento voltada para a direção do vento, elas estão perpendiculares ao vento dominante E, constituindo um conjunto de dunas barcanas ativas e transgressivas. Essas faces de deslizamentos voltadas para a direção do vento, a exemplo, ocorrem nas dunas transversais da Ilha de Santa Catarina (Bigarella *et al.* 2005).

As dunas barcanas com forma de meia-lua possuem a face convexa, orientada para o sentido do vento dominante, oposto ao da duna parabólica, como nas dunas de Canoa Quebrada (Maia 1998, Maia & Cavalcante 2005). Na PCA as barcanas estão dispostas transversalmente aos ventos de E, formando feições transgressivas e coalescentes evoluindo em dunas barcanóides, formada pela justaposição de dunas barcanas, tendo maior disponibilidade de sedimentos em períodos secos do ano.

Os Eolianitos são dunas fixas antigas na PCA, cimentadas por carbonato de cálcio, com forma piramidal, dispostas obliquamente à direção dos ventos de E. No estuário do Aracatimirim (Figura 9a) os eolianitos formam escarpas ativas por solapamento marinho. Na praia de Almofala (Figuras 9b e 9c) os eolianitos estão em contato direto com um antigo canal de maré que se transformou em lago por fechamento de barra em médio período.



Figura 9. Eolianitos na praia de Torrões (a); eolianitos na praia de Almofala (b); eolianitos em contato com a lagoa abandonada na praia de Almofala (c); detalhe de eolianito na praia de Almofala formando escarpas de praia (d).

Nos eolianitos da praia de Almofala (Figura 9d), ocorrem truncamentos, estratificações do tipo laminar plano-paralela e cruzada em médio e baixo ângulo, indicando cristas de dunas retas e mudanças na direção de fluxo de vento em longo período (Maia, 1998). Na parte interna da PCA os eolianitos (Figuras 9a, e 9c) preservam a morfologia piramidal, e altitudes  $\pm 30$  m. Nota-se a escarpa de eolianito com 1m de altitude (Figura 9b).

No sistema duna-praia de Torrões (Figuras 10 e 11), a formação da escarpa de praia pelos eolianitos marca o fim da zona de praia e o início das dunas fixadas por carbonato de cálcio sobrepostas por dunas móveis, e na parte interna os eolianitos afloram novamente (Figura 10), recobertos e fixados por vegetação (Figura 10).



Figura 10. Eolianitos na parte interna da PCA (a) e (c) com morfologia piramidal, e escarpa de eolianito (b).

As dunas frontais são móveis e formam sistemas de morfologia variada em bordas de praia (Figura 13a). Na praia de Almofala, essas dunas dispõem-se transversais à linha de costa e perpendicular à direção dos ventos dominantes de E, dominadas por ventos fortes e constantes.

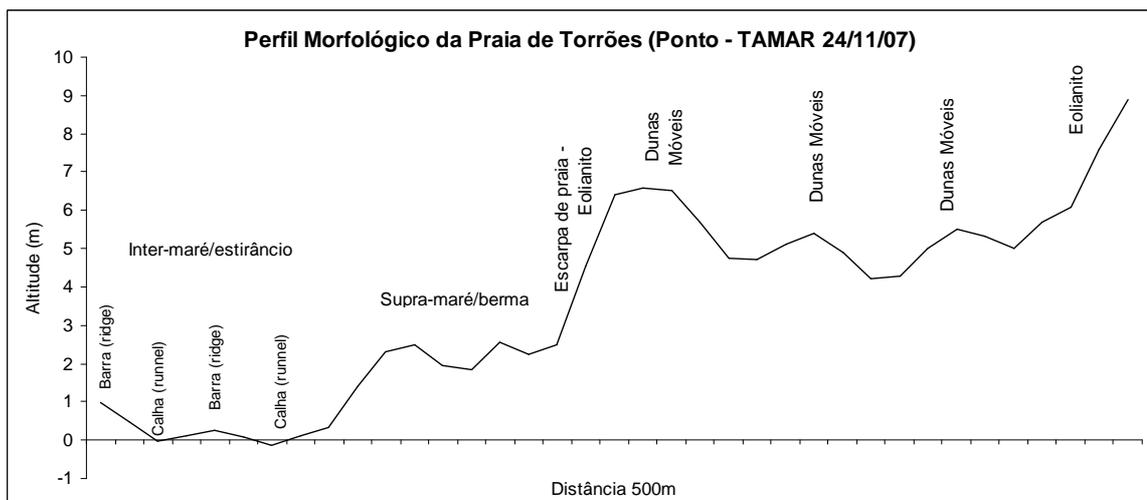


Figura 11. Perfil morfológico do sistema praia-duna superficial da Praia de Torrões, próximo ao Projeto TAMAR.

A praia de Almofala possui sistemas de dunas frontais, na parte leste (Figura 12a) e na parte oeste (Figura 12b), dispostas transversalmente à linha de costa, com relevo suavemente ondulado nas dunas móveis, e relevo plano nas praias (Figura 13).

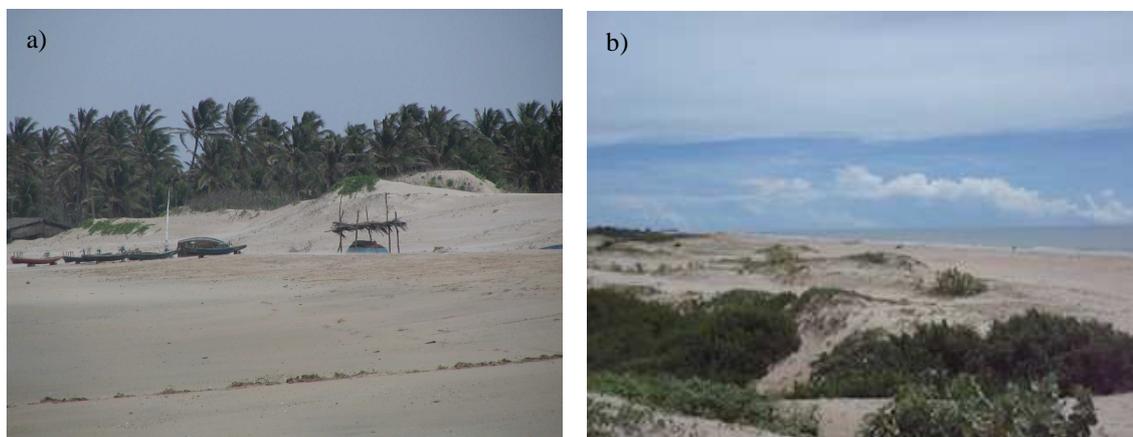


Figura 12. Dunas frontais na praia de Almofala, parte leste (a) e parte oeste (b).

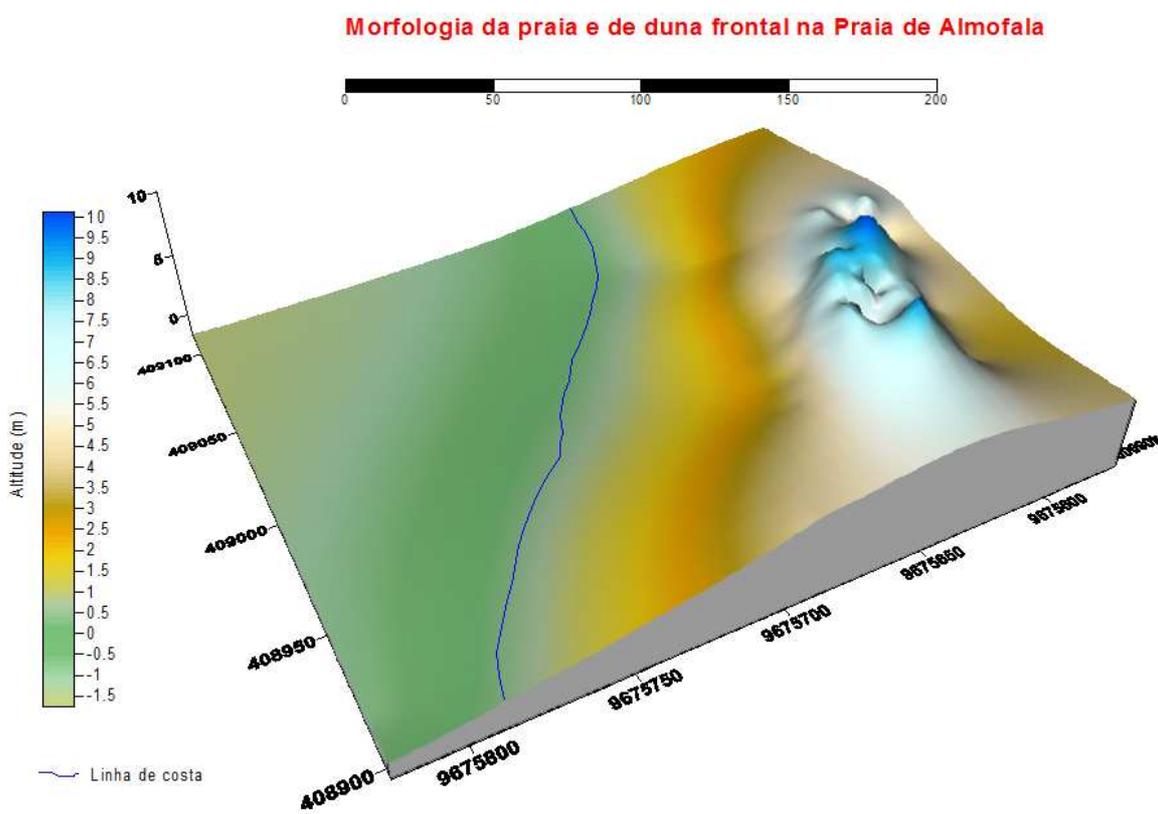


Figura 13. Morfologia da praia de Almofala e das dunas frontais.

#### 2.4.2.3.2 Cordões arenosos de Praia

A praia é constituída por um prisma arenoso recente e contínuo nas Praias de Almofala e de Torrões, em forma de sistema de barras (*rigdes*), seguidas de calhas (*runnel*), enquanto na praia da Barreira dispõem-se sobre o cordão litorâneo, desde a linha de maré baixa (LMB) até a linha de maré alta (LMA), base das dunas móveis, formadas por areia fina na zona de estirâncio (11,8%), e areia média (17,6%) na zona de pós-praia.

As praias na PCA ocupam 837.031m<sup>2</sup> (2,51%) da área total. Nas praias da Barreira, de Almofala, e de Torrões foram identificadas as zonas: de *backshore*, *foreshore* e *shoreface* (Reineck & Singh 1980), que se diferenciam pelas características morfológicas e granulométricas, tempo de exposição sub-aérea ou de inundação, e dinâmica.

A zona de *backshore* (supra-maré ou pós-praia) (Figura 14c), estende-se desde o limite entre as dunas (escarpas de praia) até a LMA, e permanece a maior parte do tempo seca, exposta ao vento, exceto nas marés altas excepcionais, quando o vento remobiliza os sedimentos mais finos, para o suprimento das dunas.

As zonas de *backshore* das praias da PCA formam cordões arenosos (cristas) arenosas que ultrapassam 2 m de altitude, alongados e semi-retos chamados de berma (Figuras 17), delimitados pela escarpa de praia e o início da zona de *foreshore* (Figura 14c).

A zona de *foreshore* ou de inter-maré (ou zona de estirâncio) (Figura 14c), estende-se da LMA até a LMB. As correntes longitudinais formam uma ou mais barras e calhas, expostas durante a maré baixa. A intensidade e direção do vento e a exposição sub-aérea deslocam as areias para a zona de *backshore* na maré baixa, engordando a faixa praial.

Em 2007, observou-se sistemas de barra e calha, bem desenvolvidos nas praias da Barreira e de Torrões (Figuras 14b e c), e escarpas de praia em Almofala (Figuras 14a). Esses sistemas evoluem por crescimento e progradação de flechas arenosas, e do desenvolvimento e emergência de barras arenosas *offshore*, que migram na direção do continente. Ocorrem em toda a extensão do litoral de Itarema (Sales 2002). Na praia da Barreira, o cordão arenoso favoreceu a sedimentação lamosa e a formação de manguezais entre a barreira e o continente.

A zona de *shoreface* ou de infra-maré, estende-se abaixo da LMB e inclui as zonas de arrebentação e de surfe, estando sempre submersa. É constituída de sistema de barras e calhas longitudinais, cuja formação está associada à arrebentação das ondas e às correntes longitudinais (Reineck & Singh 1980).

A zona de *foreshore* na quadra de estiagem (junho, julho, agosto, setembro, outubro e novembro) desenvolvem-se melhor os sistemas de barra e calha, por causa da maior atuação

dos ventos, ondas, correntes e maré (Souza Filho 2000). Na quadra chuvosa (Figura 15a), há um maior aporte de sedimentos dos rios, e maior atuação da maré (Figura 15b), permitindo a formação de linhas de maré; nas calhas na praia de Torrões nota-se a formação de linhas de marés, medindo cerca de 20 e 40 cm (Figura 15c).



Figura 14. Zona de infra-maré (ou estirâncio) com linhas de maré, e escarpa na Praia de Almofala foto (a); Estirâncio com sistema de barra e calha na praia da Barreira (b); Zona de supra-maré, e de infra-maré com sistema de barra e calha na praia de Torrões (c).



Figura 15. Praia de Almofala, com destaque para a zona de inter-maré (a) e (b); linhas de marés expostas na zona de estirâncio na praia de Almofala (b) e na praia de Torrões (c).

No início da praia da Barreira tem-se uma berma na pós-praia, e na zona de inter-maré um sistema barra e calha (Figura 17). A praia possui terraços, dunas móveis do tipo frontal, berma, e sistema barra e calha na zona de inter-maré (Figura 17).

Segundo Klein & Menezes (2001) estágios reflectivos são observados em praias semi-expostas, com grande quantidade e alta mobilidade de sedimentos subaéreos, devido aos processos de progradação e retrogradação, exibindo perfis praias convexos com areias médias, como observado na praia da Barreira (Figura 17).

Estágios dissipativos formam-se em praias semi-expostas com perfis côncavos a lineares como na praia de Ipanema (Klein & Menezes 2001). Na praia de Almofala (Figura 16 e 17) a berma e o sistema de barra e calha em baixo declive, também formam estágios dissipativos, com areias finas, e em condições de marés baixa podem formar pequenas barras em estágios de terraços de maré baixa.

Nas praias de Icapuí, litoral leste (CE) o sistema duna-praia se dispõe em cordões arenosos, e nas praias observa-se a formação de sistema barra e calha, que podem ocorrer sobrepostos a cordões litorâneos (Sales 2002), como observado nas praias da PCA. Na praia de Torrões as escarpas de praia (eolianitos) são seguidas de dunas móveis do tipo frontal, berma, e barras e calhas na zona de inter-maré (Figuras 17).

As praias da PCA possuem uma inflexão de costa com direção NW-SE que permite a deposição de sedimentos finos, condicionadas por declividades suaves e ondas pequenas, como ocorre nas de Arpoeira em Acaraú, e Ponta Grossa em Icapuí (Sales 2002).



Figura 16. Baixo gradiente topográfico na zona de estirâncio, e estágio dissipativo da praia de Almofala.

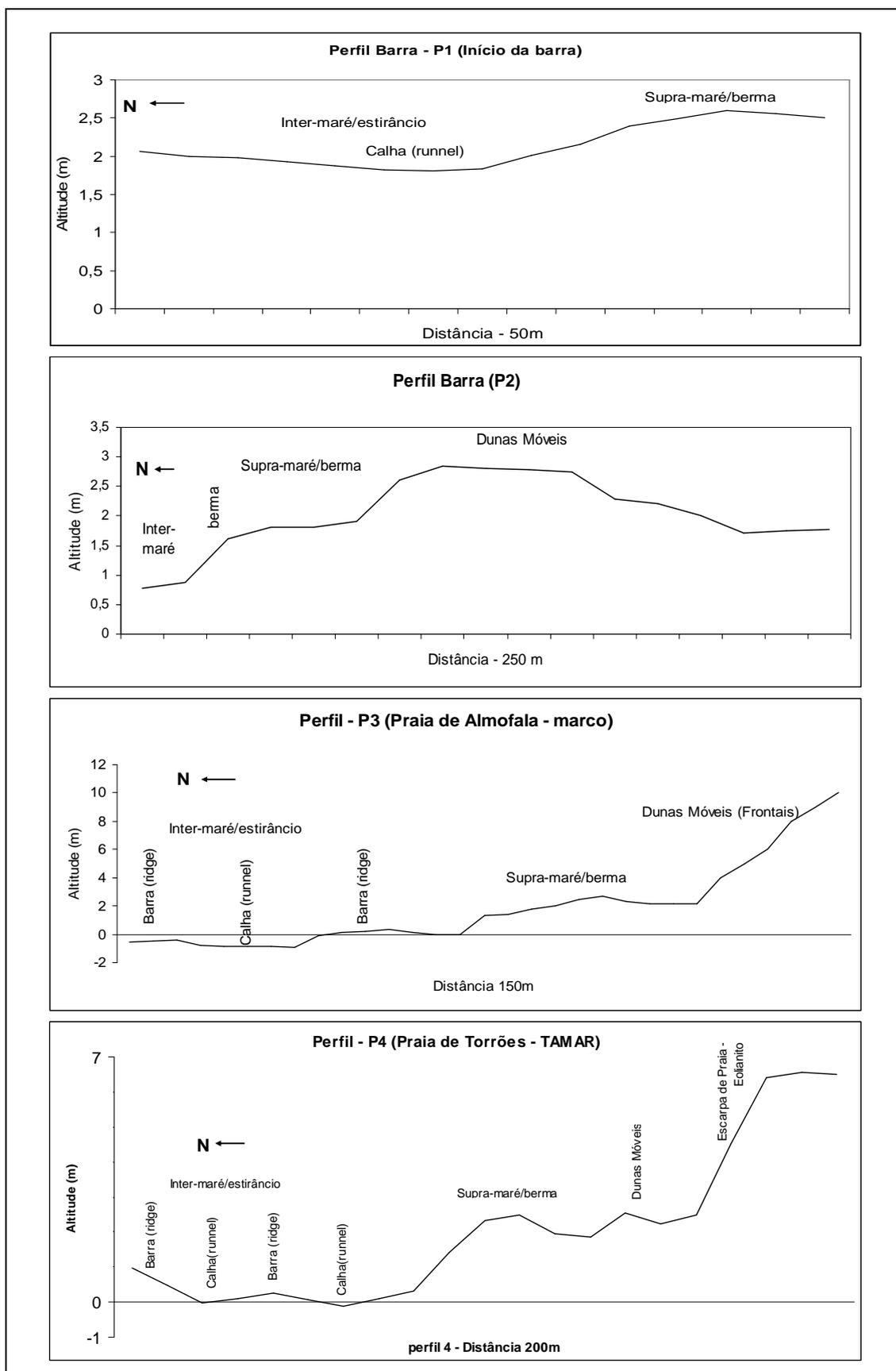


Figura 17. Perfis nas praias da Barreira (P1, P2), Almofala (P3) e Torrões (P4).

## 2.5 DISCUSSÕES

A origem e morfologia de ecossistemas costeiros e marinhos têm sua gênese vinculada às mudanças climáticas e as variações do nível do mar no Quaternário (Pleistoceno/Holoceno), quando ocorreu a gênese da maior parte das áreas costeiras do Brasil (El-Robrini 199, Suguio 1986).

A geomorfologia da zona costeira cearense caracteriza-se por um empilhamento estratigráfico a qual tem-se na base o embasamento cristalino, o Planalto Costeiro sobreposto a este, e a Planície Costeira sobreposta a ao planalto (Beltrami *et al.* 1994, Maia 1998, Sales 2002, Silva Filho 2004, Maia & Cavalcante 2005, Aguiar 2005, Sales & Peulvast 2007).

A compartimentação geomorfológica da PCA evidenciou domínios morfológicos e as principais formas do relevo, bem como processos denudacionais associados, fornecendo o mapa geomorfológico com unidades delimitadas diferenciadas, que possuem um modelo evolutivo de eventos geológicos e paleoclimáticos, homogêneo para cada subunidade que estruturam a paisagem atual.

A integração de imagem de alta resolução a MNT (grade regular) para planejamento urbano de Monte Belo do Sul por Farina *et al.* (2007), permitiu uma ótima análise do relevo. Silva Filho (2004) realizou um MNT utilizando grade regular, integrando a costa cearense a sua margem continental oceânica, obtendo bom êxito quanto à morfologia, na identificação de padrão da drenagem e entalhes, declividade, e geração de curvas de nível. Assim, os MDT's são úteis na morfologia de dunas (Pereira 2007) para o seu monitoramento, e medição da sua migração sobre a área urbana, de alto risco ambiental. O MDT na PCA foi muito útil na identificação das unidades e subunidades geomorfológicas.

Os processos de deposição, erosão e sedimentação da Formação Barreiras do Neógeno (Mioceno/Plioceno) com a deposição dos sedimentos sob forma de leques aluviais até o Quaternário (Pleistoceno), Aguiar (2005), com os rios e córregos esculpindo atualmente as formas de topo plano (tabuleiros com altitudes  $\pm 30$  m). As mudanças de clima (transgressões e regressões) condicionaram as formas de relevo atuais da PCA, com atuação dos processos de erosão, deposição, e retrabalhamento de sedimentos na costa (Callaghan *et al.* 2009).

As planícies estuarinas de Soure e Salvaterra na Ilha de Marajó possuem altitudes inferiores a 4m (França & Souza Filho 2003). A plataforma continental Amazônica possui baixas declividades nas costas de 0-40 metros (Costa & Souza Filho 2007). A plataforma continental interna da PCA possui baixa declividades e isóbatas até -10 m.

Ao longo da costa cearense encontram-se pontualmente rochas de praia (beach rocks) como em Fortaleza e Paracuru que são corpos arenosos de geometria tabular e cimentação calcítica, em desembocaduras fluviais atuais ou pretéritas (Maia 1998). Na PCA a plataforma de abrasão é de sedimentos da Formação Barreiras, tabular e cimentada por calcificação.

A Planície flúvio-lagunar inunda periodicamente e sazonalmente (de janeiro a abril), sofre influência das marés, contudo está em transição para Planície Flúvio-lacustre, devido a comporta construída no canal de maré que liga a Laguna Salgada ao mar (que integra o Lagamar do Sargento). A comporta é aberta e fechada para fins particulares causando salinização do solo e água, e morte da fauna e flora.

Extensas planícies de inter-marés formam-se em áreas com alta influência de processos fluviais e marinhos, e presença de canais de maré de climas tropicais úmidos como na costa norte do Brasil (Souza Filho & Paradella 2005, e França & Souza Filho 2006). A influência do clima tropical chuvoso na PCA, em comparação com a costa norte do Brasil, propicia o desenvolvimento de áreas menores de planícies de inter-marés, pela menor influência dos rios.

Os cordões arenosos de dunas que ocupam a maior área da PCA (41% da área total) migraram no século passado, e as dunas soterraram parte da área urbana (Meireles 2004). Os cordões dunares arenosos na parte interna da PCA incluem as dunas fixas por carbonato de cálcio (eolianito) ou vegetação, e ultrapassam os 20 m de altitude, que formaram-se em condições de clima seco e fortes ventos (Bigarella *et al.* 2005).

As praias de Almofala e de Torrões (com estágios dissipativos) possuem características peculiares, se comparadas com a maioria das praias do estado Ceará como a Prainha em Aquiraz (com alta inclinação de ondas e com alta declividade, areias médias a grossas, e praias expostas de estágios intermediários a refletivos) (Maia & Cavalcante 2005). As praias da PCA, como as de Arpoeira em Acaraú, e Ponta Grossa em Icapuí (Sales 2002), possuem uma inflexão de costa com direção NW-SE que permite a deposição de sedimentos finos, condicionadas por declividades suaves e ondas pequenas (Figura 17).

Nas praias da PCA tem-se variadas feições, e a planície arenosa possui sistemas de calhas e barras, na zona de intermaré, mais expressivas nas praias de Almofala e Torrões. Nas zonas de supra-marés das três praias, com a presença de bermas. As altitudes mais baixas emersas são as praias.

Atualmente, as principais mudanças morfológicas que ocorrem em zonas costeiras envolvem as atividades humanas (uso e ocupação), ou os processos naturais de recuo ou avanço da linha de costa, condicionados pelos fatores geológicos e agentes hidrodinâmicos, e

oceanográficos, acentuados por eventos extremos (El niño e La niña, tempestades, ciclones e ressacas) como na praia do Balneário Piçarras (Klein *et al.* 2009). Na PCA as mudanças atuais respondem aos mesmos processos, no entanto, não ocorrem ciclones na região, e nas praias predominam o recuo da linha de costa, criando zonas de acentuada erosão “hot spot”.

## 2.6 CONCLUSÕES

As feições geomorfológicas de maior altitude incluem os tabuleiros litorâneos que ultrapassam os 30m, e secundariamente as dunas que ultrapassam os 20m de altitude. As altitudes mais baixas são as praias.

O mapeamento da compartimentação geomorfológica da PCA por integração de dados de sensores remoto, MDT's, topografia em SIG's, permitiu caracterizar e analisar a morfologia da PCA.

A Planície Costeira de Almofala constitui-se de: planalto costeiro recoberta por areias finas a muito finas (tabuleiros e plataforma de abrasão); planície aluvial (planície de inundação e terraços); planície estuarina (planície flúvio-lagunar, planície de inter-maré, canais de maré, e deltas); e planície arenosa com areias médias (cordões arenosos de dunas e praias atuais, e terraços arenosos).

## 2.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguiar P. F. 2005. *Zoneamento Geoambiental no Litoral Leste do município de Beberibe – CE*. Dissertação de Mestrado. Departamento de Geologia. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará. 157p.
- Ayoade J. O. 1996. *Introdução a Climatologia para os Trópicos*. Tradução Maria Juraci Zami dos Santos, revisão Suely Bastos. Coordenação Editorial de Antônio Cristofolletti. 4ª edição. Rio de Janeiro, p. 224-264.
- Baptista P., Bastos L., Bernards C., Taborda R. 2006. Morphodynamics of Exposed Sandy Beaches. *Journal of Coastal Research*, Special Issue 39: 355-359.
- Barreto Neto A. A., Moreira E. C., Silva A. B. 1999. *Metodologia para avaliação dos erros em bancos de dados espaciais para uso em sistemas de informações georeferenciadas (SIG)*. In: GIS BRASIL99, Salvador. Anais Salvador: FatorGIS, 1: 1-4.
- Beltrami C. V., Alves L. E. M., Feijó F. J. 1994. Bacia do Ceará. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, Rio de Janeiro, 8 (1): 117-126.

- Bigarella J. J., Klein A. H. da F., Menezes J. T., Vintém G. 2005. Sub-Tropical Coastal Dunes: Examples from Southern Brazil. *Journal of Coastal Research*. West Palm Beach, Florida Spring. 1: 113-137.
- Camara G. & Medeiros J. S. 2000. *Introdução à Ciência da Geoinformação*. São José dos Campos: INPE.
- Callaghan D., Ranasinghe R., Short A. 2009. Quantifying the storm erosion hazard for coastal planning. *Coastal Engineering*, 56: 90–93. DOI:10.1016/j.coastaleng.2008.10.003
- Costa I.G. da C., Beltrami C.V., Alves L.E.M. 1990. A evolução tectono-sedimentar e o habitat do óleo da Bacia do Ceará. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, Rio de Janeiro, 4 (1): 65-74.
- Costa F. R. & Souza Filho P. W. M. 2007. Utilização de Modelos Digitais de Elevação na Representação do Relevo Submerso e Emerso na Zona Costeira Amazônica. *Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril, INPE, p. 2485-2492.
- SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - CPRM. 2003. *Atlas de geologia e Recursos minerais do Ceará: Sistemas de Informações Geográficas - SIG*. Mapas na escala 1:500.000. Brasil: CPRM, Fortaleza: CNPQ, ICD-Rom.
- Davis R. A. Jr. 1983. *Depositional System: A Genetic Approach to Sedimentology Geology*. New Jersey: Prentice Hall. 669p.
- \_\_\_\_\_. 1992. *Depositional System: An Introduction to Sedimentology and Stratigraphy*. 2 ed. New Jersey: Prentice Hall. 604p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. 1979. *Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos*. In: REUNIÃO TÉCNICA DE LEVANTAMENTO DE SOLOS, 10, 1979, Rio de Janeiro. Súmula...Rio de Janeiro, 83p.
- Felgueiras C. A. & Câmara G. 2010. *Modelagem numérica de terreno*. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. *Introdução a Ciência da Geoinformação*. São José dos Campos: DPI, 2006. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/>>. Acesso em: 15 agosto de 2010.
- Florenzano T. G. 2002. *Imagens de satélite para estudos Ambientais*. São Paulo: Oficina de Textos, 97p.
- Folk R. L. & Ward C. 1957. Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27 (1): 3-26.
- França C. F. de F. & Souza Filho P. W. M. 2003. *Análise das Mudanças Morfológicas Costeiras de Médio Período na Margem Leste da Ilha de Marajó, (Pa) em Imagem Landsat*. *Revista Brasileira de Geociências*. 33 (2): 127-136.

- FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS - FUNCEME. 2010. *Meteorologia e Oceanografia*. Fortaleza: FUNCEME. Acessado em: 10 de setembro de 2010. <http://www.funceme.br/DEMETS/index.htm>.
- Freire G. S. S. & Cavalcanti V. M. M. 1998. *Cobertura sedimentar quaternária da plataforma continental do Estado do Ceará*. Fortaleza: DNPM/LGMA-UFC, 42p.
- Freire G. S. S. & Morais J. O. 2003. *Plataforma Continental do Ceará*. in A Zona Costeira do Ceará: Diagnóstico para a Gestão Integrada. Coordenadores Alberto Alves Campos *et al* Fortaleza: AQUASIS, 293p.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. 2009. *Manual Técnico de Geomorfologia*. ISBN 978-85-240-4110-5. 2ed. Rio de Janeiro: Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais do IBGE. (Manuais técnicos em geociências, ISSN 0103-9598; n. 5. 188p.
- Jensen J. J., Halls J. N., Michel J. 1998. A systems approach to environmental sensitivity index (ESI) mapping for oil contingency planning and response. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 64 (10): 1003-1014.
- Li R.; Deshpande S., Niu X., Lee I-C., Wu B. 2008. Multi-dimensional geospatial data integration for coastal change analysis. The International Archives of the Photogrammetry, *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Beijing XXXVII (B8): 1311-1316.
- Klein A. H. da F. & Menezes J. T. de. 2001. Beach Morphodynamics and Profile Sequence for a Headland Bay Coast. *Journal of Coastal Research*. West Palm Beach, Florida Fall. 17 (4): 812-835.
- Kozciak S., Rostirola S.P., Fiori A.P. 1999. Análise comparativa entre métodos de interpolação para construção de modelos numéricos do terreno. *Boletim Paranaense de Geociências*. Curitiba, 47: 19-30.
- Maia L. P. 1998. *Processos costeiros y balance sedimentario a lo largo de Fortaleza (NE – BRASIL): Implicaciones para una gestión adecuada de la zona litoral*. Tese de Doutorado. Universidade de Barcelola, Barcelona-ES. 269 p.
- Maia L. P. & Cavalcante V. M. M. 2005. *Mapeamento das Unidades Geoambientais da Zona Costeira do Estado do Ceará*. Programa Zoneamento Ecológico-Econômico da Zona Costeira do Estado do Ceará. Fortaleza: SOMA/SEMACE/LABOMAR. 226 p.
- Millette T. L., Argow B. A., Marcano E. Hayward C., Hopkinson C. S., Valentine V. 2010. Salt Marsh Geomorphological Analyses via Integration of Multitemporal Multispectral Remote Sensing with LIDAR and GIS. *Journal of Coastal Research*. West Palm Beach, Florida. 26 (5) 809–816.
- Pereira C. Q. 2007. *Modelagem numérica do terreno (MNT) a partir de dados levantados com receptores GPS e estação total em área sujeita a processos erosivos costeiros*. Projeto Cartográfico Engenharia Cartográfica/UERJ, 60 p.

- Suguio K. 1999. *Geologia do Quaternário e mudanças ambientais: (passado + presente = futuro?)*. São Paulo: Paulo's Comunicações e Artes Gráficas, 366 p.
- Sales V. C. C. 2002. *Évolution Géomorphologique de la Zone Côtière le L'état du Ceará, Nord-Est Du Brésil: du Long Terme au Court Terme*. Tese de Doutorado. Paris: Université Paris-Sourbonne. 513 p.
- Sales V. de C. & Peulvast J-P. 2007. Evolução Morfoestrutural do Relevo da Margem Continental do Estado do Ceará, Nordeste do Brasil. *Caminhos de Geografia - revista on line* <http://www.ig.ufu.br/revista/caminhos.html> Uberlândia, ISSN 1678-6343, 7 (20): 1 – 21.
- Silva Filho W. F. da. 2004. *Domínios Morfoestruturais da Plataforma Continental Do Estado Do Ceará*. Orientador: Iran Carlos Stalliviere Corrêa. Tese de Doutorado. Porto Alegre - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 288p.
- Souza M. J. N. de. 1989. Contribuição ao Estudo das Unidades Morfo-Estruturais do Estado do Ceará. Fortaleza: *Revista de Geologia* (1): 73-91.
- Souza M. J. N. de. 1994. *Zoneamento Geoambiental do Estado do Ceará*. In: Ceará - Projeto Áridas: Grupo I - Recursos Naturais e Meio Ambiente. Fortaleza: Secretaria de Planejamento; Fundação Cearense de Meteorologia. 2:183-206.
- Souza Filho P. W. M. 2000. *Avaliação e Aplicação de Sensores Remotos no Estudo de Ambientes Costeiros Tropicais Úmidos, Bragança, Norte do Brasil*. Tese de Doutorado. Centro de Geociências. Universidade Federal do Pará. Belém: UFPA. 236 p.
- Souza Filho P. W. M. & El-Robrini M. 2000. Coastal Zone Geomorphology of the Bragança Area, Northeast of Amazon Region, Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, 30: 518-522.
- Souza Filho P. W. M. & Paradella W. R. 2005. Use of RADARSAT-1 Fine Mode and Landsat-5 TM selective principal component analysis for geomorphological mapping in a macrotidal mangrove coast in the Amazon Region. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 31: 214-224.
- Summerfield M. A. 1991. *Global geomorphology: an introduction to the study of landforms*. New York, Longman, 537 p.
- Reineck H-E. & Singh I.B. 1980. *Depositional Sedimentary Environments*. 2. ed. New York, Springer-Verlag. 543 p.
- Yoshikawa S. & Nemoto K. 2010. Seasonal variations of sediment transport to a canyon and coastal erosion along the Shimizu coast, Suruga Bay, Japan. *Marine Geology*, 271: 165-176. doi:10.1016/j.margeo.2010.02.010

### **3 MUDANÇAS MORFOLÓGICAS NA PLANÍCIE COSTEIRA DE ALMOFALA EM MÉDIO PERÍODO UTILIZANDO TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO**

3.1 ANÁLISE MULTITEMPORAL DA LINHA DE COSTA EM MÉDIO PERÍODO (1958-2004) NA PLANÍCIE COSTEIRA DE ALMOFALA, ITAREMA, CEARÁ, BRASIL, UTILIZANDO IMAGENS DE SATÉLITES E FOTOGRAFIAS AÉREAS <sup>2</sup>

**Shoreline multitemporal analysis in mid-term (1958-2004) of the Almofala coastal plain, Itarema (Ceará, Brazil) using satellite images and airborne photography's**

#### **Resumo**

A linha de costa da planície costeira de Almofala sofreu mudanças na sua posição geográfica em médio período (46 anos - 1958-2004). A área inclui as praias de Almofala, da Barreira e de Torrões localizada na costa oeste do Ceará, influenciadas por altas temperaturas, pluviometria média de 1172,21 mm (1977/2004), velocidade média ventos de 5,5 m/s, regime de meso-marés (1,48 m) e altura significativa das ondas de 0,56 m. A metodologia consistiu em: (1) aquisição de fotografias aéreas multitemporais (1958 e 1988) e imagens ortorretificadas do satélite Quickbird de alta resolução (2004); (2) georreferenciamento de fotografias aéreas através de pontos de controle extraídos das imagens Quickbird; (3) integração de interpretação visual das imagens do satélite Quickbird e das fotografias aéreas; (4) geração dos mapas de progradação e retrogradação na escala 1: 50.000. Os resultados mostraram uma maior intensidade de processos de erosão da linha de costa: (1) retrogradação de -1314911,2 m<sup>2</sup>/46 anos (1958/2004) (59,7%); e (2) progradação de 888045,47 m<sup>2</sup> (40,3%).

**Palavras chaves:** linha de costa; médio período; sensoriamento remoto

#### **Abstract**

The coastal line to Almofala coastal plain had much changes in your geographic position in mid-term (46 years - 1958-2004). This area include Almofala, Barreira and Torroes Beachs placed in the west coastal zone of Ceara, conditioned for high temperatures, media raining 1172,21 mm, media velocity winds 5,5 m/s, mesotidal coast (1,48 m) and height waves to 0,56 m. The methodology consisted: (1) collection multi-temporal airborne photography's (1958 and 1988) and Quickbird satellite images (2004) ortho-retificatied of high resolution; (2) georeference of airborne photography for control points extracted Quickbird images; (3) integration to visual interpretation by Quickbird satellite images and airborne photography's;

<sup>2</sup> Artigo submetido na Revista Quaternary and Environmental Geosciences em 15 de maio de 2010. Autores: Ponciana Freire de Aguiar <sup>1</sup> (UFPA), Prof. Dr. Maamar El-Robrini <sup>2</sup> (UFPA) e Prof. Dr. George Satander Sá Freire <sup>2</sup> (UFC).

(4) progradation and retrogradation mapping in scale 1: 50.000. The results showed a major intensity to shoreline erosion process: (1) retrogradation of  $-1314911,20 \text{ m}^2/46\text{years}$  (1958/2004) (59,7%); and (2) progradation by  $888045,47 \text{ m}^2$  (40,3%).

**Key words:** coastal line; mid-term; remote sensing

### 3.1.1 Introdução

A dinâmica da planície costeira de Almofala (PCA) (praias de Almofala, da Barreira e de Torrões) é influenciada por fatores climáticos/meteorológicos (ventos, chuvas, pressão, evaporação), oceanográficos (ondas, marés, correntes), sedimentológicos (transporte litorâneo de sedimentos), de oscilações do nível relativo do mar, além de ser afetada por atividades antrópicas (ocupação humana, desmatamento, fazenda de camarões). Este artigo revela um significativo recuo da linha de costa da PCA.

Além disso, a PCA é condicionada por mudanças naturais (processos de erosão, transporte e sedimentação) que agem nos substratos costeiros, que, juntamente com a vegetação e a presença de desembocaduras de rios, refletem no comportamento da costa (Souza Filho 2000, Souza Filho & El-Robrini 2000, Souza Filho & Paradella 2002; Short & Trembanis 2004, Klein *et al.* 2009), tornando a linha de costa vulnerável aos riscos ambientais (Kulmar *et al.* 2010), agravados pela elevação do nível do mar (Coward *et al.* 2010).

Os sistemas oceanográficos e hidrodinâmicos que condicionam a dinâmica da linha de costa podem ser afetados por eventos extremos (El Niño e La Niña) (Souza Filho 2000), tempestades e ressacas (Klein *et al.* 2009, Calliari *et al.* 2010), causando aumento de temperaturas do ar e do mar, mudanças na circulação do ar, nas correntes marinhas, na precipitação e no suprimento de sedimentos para a costa.

O uso de imagens multiespectrais em sensoriamento remoto tornou-se uma ferramenta essencial para os estudos ambientais (Câmara 2000, Yoshikawa *et al.* 2010), sendo uma técnica útil para o conhecimento da evolução da PCA, pois permitiu obter informações sobre a variabilidade da posição da linha de costa em médio período, utilizando Sistema de Informações Geográficas (SIG's), e cálculo das zonas de progradação e de retrogradação.

O sensoriamento remoto é fundamental em áreas com base cartográfica inexistente, desatualizada ou com escala inadequada (Jensen *et al.* 1990, 1993) com vantagens de redução dos custos e tempo gastos. Os aspectos espaciais são analisados por superposição de planos de

informação (PI) em Banco de Dados Geográficos (BDG's), permitindo a integração dos dados (imagem, mapas, redes e atributos) em SIG.

O satélite Quickbird II (2,88 m de resolução no multiespectral) possibilita o uso de imagens fotogramétricas e de sensores orbitais para extração de informações métricas, temáticas e de evolução do terreno com maior exatidão espacial (Brito & Filho 2002).

As fotografias aéreas possuem informações de décadas passadas (em grande escala), importantes no estudo de evolução, da viabilidade e aplicabilidade de técnicas de interpretação como: o uso de fotografias aéreas integradas a imagens de alta resolução Quickbird que também possuem informações em grande escala e dados recentes (2004); e na delimitação da linha de costa das praias da PCA em médio período (1958 - 2004).

As mudanças costeiras naturais e antrópicas foram quali-quantificadas com o uso de integração de dados e imagens de sensores remotos em SIG's conforme metodologias já aplicadas (Barale & Folving 1996, Short 2004, Chen *et al.* 2005, Trebossen *et al.* 2005, Thieller *et al.* 2005, Li *et al.* 2008, Klein *et al.* 2009), através de estudos de evolução da linha da costa baseados no uso de geoindicadores: escarpas de praia e plataforma de abrasão costeira (Berger 1996, Forbes & Liverman 1996).

No Brasil as mudanças costeiras em médio período vêm sendo quali-quantificadas por estudos de: avaliação e aplicação de sensores remotos no estudo de ambientes costeiros tropicais úmidos em Bragança (Souza Filho *et al.* 2000); morfologia e mudanças costeiras da margem leste da Ilha de Marajó - PA (França 2003); estabilidade de praias erosivas da Baía de Santa Catarina (Klein *et al.* 2003); perigos e riscos associados a processos costeiros no litoral sul do Brasil - RS (Calliari *et al.* 2010).

Pesquisas sobre a dinâmica costeira no estado do Ceará em médio período foram realizadas: no estudo geomorfológico-sedimentológico do litoral de Beberibe (Morais 1975); processos e impactos ambientais em zonas costeiras (Morais 1996); evolução geomorfológica da zona costeira do Ceará (Sales 2002); dinâmica costeira entre Cumbuco e Matões, costa NW do Ceará (Carvalho 2003); influência dos processos estuarinos na morfodinâmica e vulnerabilidade a erosão da Prainha de Aquiraz (Pinheiro *et al.* 2006); variação da linha de costa do Porto do Mucuripe (Pinheiro & Morais 2007); uso de técnicas de geoprocessamento para a análise da evolução da linha de costa no estado do Ceará (Farias & Maia 2010).

Este artigo tem como objetivo analisar a variabilidade da linha de costa de Almofala em período médio (1958-2004), identificando e quantificando áreas de erosão (retrogradação) e de deposição (progradação).

### 3.1.1.1 Localização e caracterização geográfica na PCA

A linha de costa da PCA (praias de Almofala, da Barreira e de Torrões) possui 8 km, localizada no município de Itarema, costa oeste do estado do Ceará (Figura 1), enquadrada entre as coordenadas UTM: X1: 403500 E, 9673000 N, X2: 412500E, 9680000 N. Limita-se ao sul com o distrito de Carvoeiro, ao norte com o Oceano Atlântico, a sudeste com o distrito de Patos, e a oeste com a praia da Barra, distando 185 Km de Fortaleza.

A PCA é influenciada por um clima tropical chuvoso e quente (Ayoade 1996) com altas temperaturas, variando entre a máxima de 30°C e mínima de 22°C (Rocha *et al.* & El Robrini 2002). As chuvas concentram-se entre janeiro e abril, a média pluviométrica é de 1172,21 mm (1977-2004), a mínima de 350 mm e a máxima de 2886 mm (FUNCEME 2010). A velocidade média dos ventos é de 5,5 m/s com direção preferencial de E, e secundariamente ENE e ESE. O regime de meso-marés possui altura média de 1,48 m, altura significativa das ondas de 0,56 m, e corrente longitudinal direcionada para NW.

Anomalias climáticas como o El Niño podem afetar a dinâmica costeira, têm-se registros desse evento entre 1982/83, 1997/98 (intensidade forte), e entre 1977/1978, 1986/1987, 1992/1993, 1993/1994, 2002/2003, 2004/2005 (intensidade moderada a forte). Têm-se registros de La Niña entre os anos de 1975/76, 1984/85, 1988/89 e 1995/96, 1998/1999, 1999/2000, 2001/2002 (CPTEC 2008, FUNCEME 2010).

A PCA é recortada pelo rio Aracatimirim que deságua na praia de Torrões, com padrão dendrítico e paralelo. A área possui o Lagamar do Sargento, maior corpo d'água da área, e córregos como o Lamarão e o Paná, com nascentes nos sedimentos da Formação Barreiras e nos Depósitos Quaternários, além de canais de maré na praia da Barreira. A cobertura vegetal da PCA inclui: a mata de tabuleiro que recobre o planalto costeiro; a mata ciliar que envolve as áreas de inundação; a vegetação de dunas que recobre as planícies arenosas e eólicas; e o manguezal que recobre as planícies estuarinas (Fernandes 2004).

Na PCA afloram duas unidades geológicas: a Formação Barreiras (Mioceno/Plioceno); e os Depósitos Quaternários (Holoceno). A área está instalada na borda da margem passiva e é recortada por uma falha inferida de sentido NE-SW (Carvalho 2003, CPRM 2003).

Duas unidades geomorfológicas ocorrem na PCA (Sales 2002, Maia & Cavalcante 2005): (a) o Planalto Costeiro ou tabuleiro litorâneo aplainado, de superfície pediplanada; e (b) a Planície Costeira que inclui: planícies aluviais, planícies estuarinas e planícies arenosas.

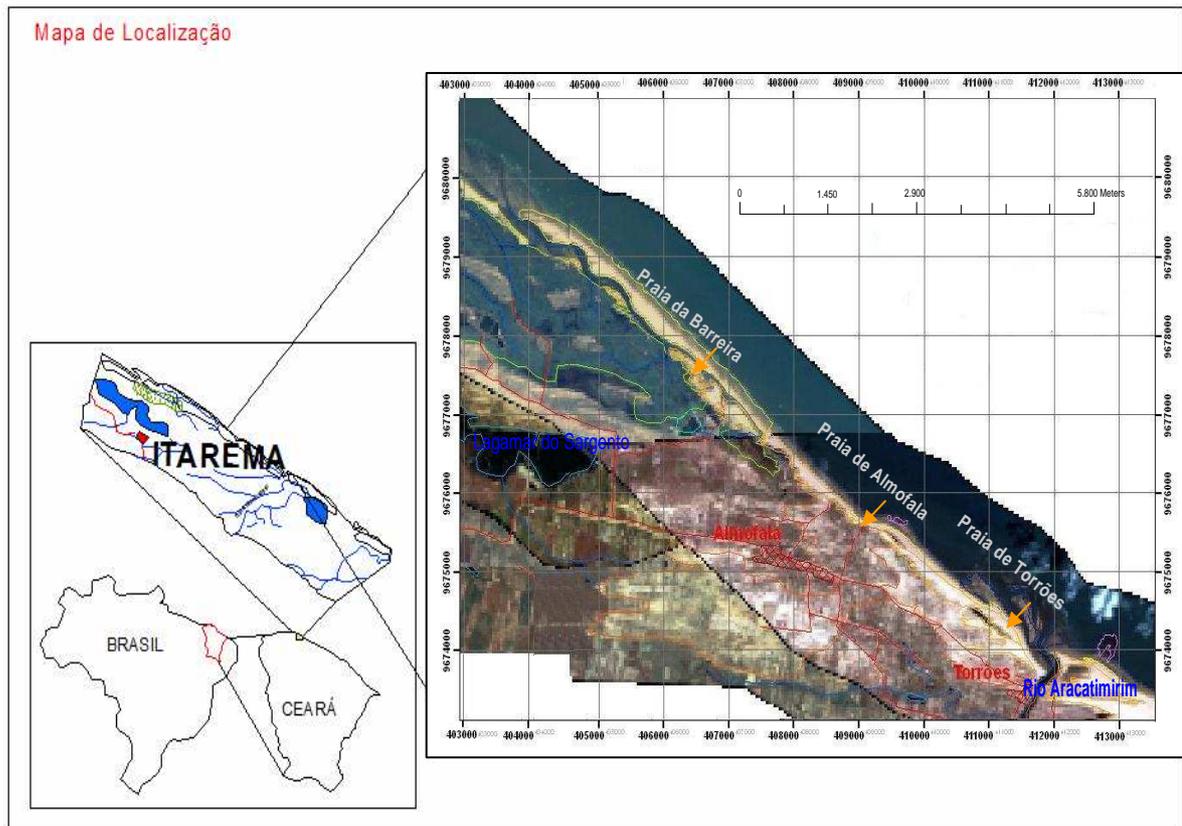


Figura 01. Mapa de localização da Planície Costeira de Almofala.

### 3.1.2 Metodologia

A metodologia foi um estudo descritivo e explicativo com identificação e quantificação das variáveis, fichamento das leituras realizadas e reavaliação sistemática da bibliografia pré-existente. Conjuntamente, realizou-se a aquisição das fotografias aéreas dos anos de 1958 (1:25.000) e 1988 (1:32.500), e das imagens ortorretificadas do satélite Quickbird (2004), seguido de procedimentos laboratoriais (mapeamentos, análises, e processamento de dados) mediante o uso de SIG's (PCI 8.0 e ArcGIS 8.9).

Foram realizados dois trabalhos de campo na PCA: (1) dias 11 e 12/05/2007 para reconhecimento de áreas, identificar feições, unidades e subunidades geomorfológicas, e geoindicadores da área; (2) dias 24 e 25/11/2007 para comprovação de dados e mapeamentos.

Os dias e os horários de passagem das fotografias aéreas e das imagens Quickbird foram escolhidos condizentes com a linha de maré baixa (LMB) disponibilizada no site do DHN (2007), para a análise em médio período.

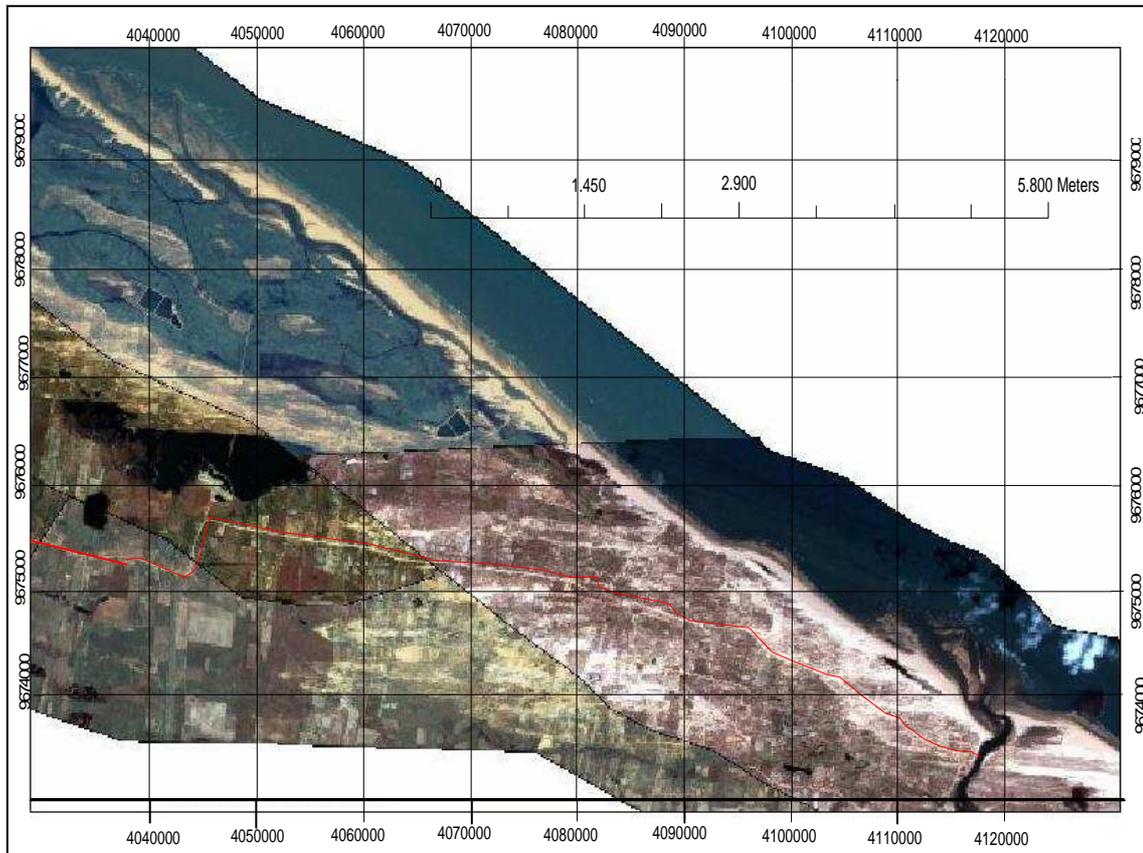


Figura 2. Mosaico das imagens Quickbird (2004) na PCA.

### 3.1.2.1 Sensoriamento Remoto

A linha de costa da PCA foi delimitada por geoindicadores (escarpas de praia e plataforma de abrasão) para a representação da dinâmica costeira em médio período (46 anos - 1958 à 2004), através da interpretação visual das fotografias aéreas (1958 e 1988) e das imagens Quickbird (2004), na escala de 1:50.000.

As interpretações das imagens Quickbird e fotografias aéreas multitemporais foram feitas nos SIG's (da EASI-PACE Geomática-PCI 8.0, e da ESRI - ArcGIS 8.9), com integração de dados em BDG's, cálculos de áreas de erosão e progradação da linha de costa.

A identificação dos geoindicadores escarpas de praia e plataforma de abrasão (Figura 3) permitiu fixar a posição da linha de costa a partir de 1958, paralela a LMB (que segue a linha de espraiamento), e visualizar as mudanças em 1988 e em 2004.

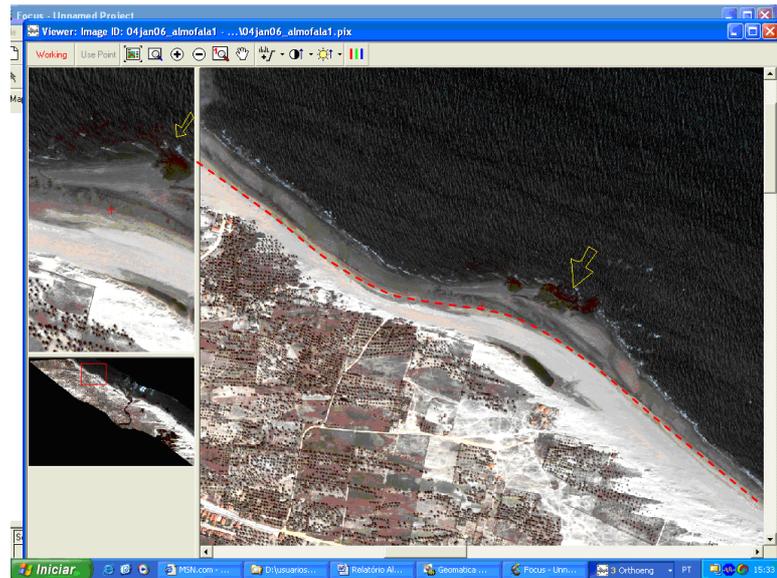


Figura 3. Linha de costa (2004) e plataforma de abrasão da praia de Almofala (seta), em zoom no focus do aplicativo PCI 8.0.

#### 3.1.2.2.1 Imagens Quickbird

Os dados de entrada das imagens ortorretificadas Quickbird constituem: datum geocêntrico WGS 84 com projeção coordenadas geográficas, zona -24 e resolução radiométrica 11 bits. Estas imagens foram reprojetaadas no aplicativo PCI 8.0 para o datum SAD 69, Projeção UTM, zona -24, e foram utilizadas no georreferenciamento das fotografias aéreas e na delimitação da linha de costa de 2004.

Foram utilizados os seguintes dados das imagens Quickbird:

- Datum WGS 84; projeção coordenadas geográficas; zona -24 (42°W – 36°W); formato = 11 bits; sensor CCD; resolução bandas multi-espectrais/visível: 450-520 nm, 520-600 nm, 630-690 nm; resolução espacial: 2,4 a 2,8 m (Quadro 1).
- Mosaicos de imagens do satélite Quickbird ortorretificadas de nível orbital, sensor remoto de alta resolução, escala 1:25.000, imageadas em 06 de janeiro, 09 de setembro e 15 de outubro de 2004.

As imagens multiespectrais Quickbird (2004) foram georreferenciadas no aplicativo PCI 8.0 e importadas para o aplicativo ArcGis 8.9, onde foram feitas a interpretação visual das imagens e a digitalização da linha de costa (Figura 2), além das operações necessárias como subtração e adição de áreas da linha de costa, e os cálculos de erosão e acreção.

Quadro 1. Características das imagens Quickbird.

Sensor CCD	Bandas Espectrais	Resolução Espectral	Resolução Espacial	Resolução Temporal	Faixa Imageada
QUICKBIRD (2004)	MULTIESPECTRAL (Visível)	450 - 520 nm	2,4 a 2,8 m	1 a 3,5 dias, dependendo da latitude	16,5 x 16,5 km
		520 - 600 nm			
		630 - 690 nm			

### 3.1.2.2.2 Fotografias Aéreas

As fotografias aéreas passaram por pré-processamento (georreferenciamento) para inserir um datum e a projeção cartográfica no aplicativo Global Mapper, com dados de entrada e saída condizentes com os dados de saída das imagens Quickbird (Datum SAD 69, Projeção UTM, zona -24 (42°W – 36°W) *South American* 1969).

As fotografias aéreas foram georreferenciadas e mosaicadas (Figuras 4 e 5) utilizando os pontos de controle das imagens ortorretificadas do satélite Quickbird, tendo como referência: interseção de estradas e rios, estruturas perceptíveis como falhas e a plataforma de abrasão, no aplicativo PCI 8.0.

Os mosaicos de cinco e quatro fotografias aéreas de 1958 e 1988 (Figuras 4 e 5) respectivamente foram importadas no aplicativo ArcGis 8.9, onde foi feita a digitalização da linha de costa de cada ano e calculadas as áreas, para realização dos mapas das zonas de prograduação e retrograduação da PCA, conforme metodologia de Thieller *et al.* (2005).

Foram utilizados os seguintes dados das fotografias aéreas:

- Imagens de sensores remotos de nível suborbital e resolução variada das fotografias aéreas da SUDENE, cedidas pelo INCRA.
- Fotografias aéreas de: 1958 na escala: 1: 25.000; resolução espectral: visível; resolução espacial: 5 m; data: 06/58; mosaico - número das fotos: 11862, 11863, 11867, 11869, 1970 (Quadro 2).
- Fotografias aéreas de: 1988 na escala: 1: 32.500; resolução espectral: visível; resolução espacial: 10 m; data: 10/88; mosaico - número das fotos: 30, 31, 32, 33 (Quadro 2).

Quadro 2. Características das fotografias aéreas

Foto aérea	Escala	Resol. Espectral	Res. Espacial	Data	Mosaico - Número das Fotografias
1958	1: 25.000	Visível	5m	06/58	11862, 11863, 11867, 11869, 1970
1988	1: 32.500	Visível	6,5m	10/88	30, 31, 32, 33

### 3.1.2.2.3 Cálculo de erro

Com base nos erros dos pontos de controle e por meio de regra de três simples, estabeleceu-se a margem de erro geométrico para cada fotografia aérea e o erro geométrico máximo (cumulativo).

Os erros das fotografias aéreas de 1958 (11862, 11863, 11867, 11869, 1970) foram de 0,535, 0,472, 0,485, 0,348 e 0,425, respectivamente, com erro médio de 0,453. Os erros das fotografias aéreas de 1988 (30, 31, 32, 33) foram de 0,446, 0,572, 0,491, e 0,459, respectivamente, com valor médio de 0,492. Os valores médios foram utilizados para calcular o erro cumulativo.

Assim, o erro cumulativo foi calculado a partir das resoluções das fotografias aéreas e das imagens Quickbird. O erro cumulativo linear de 1958/1988 foi de 11,5 m, o de 1988/2004 foi de 9,3 m, enquanto o erro cumulativo das áreas foi de 59,9 m<sup>2</sup> para o período de 1958/1988 e 40,4 m<sup>2</sup> para o período de 1988/2004, sendo foram as menores distâncias lineares e áreas possíveis de serem mapeadas da PCA.

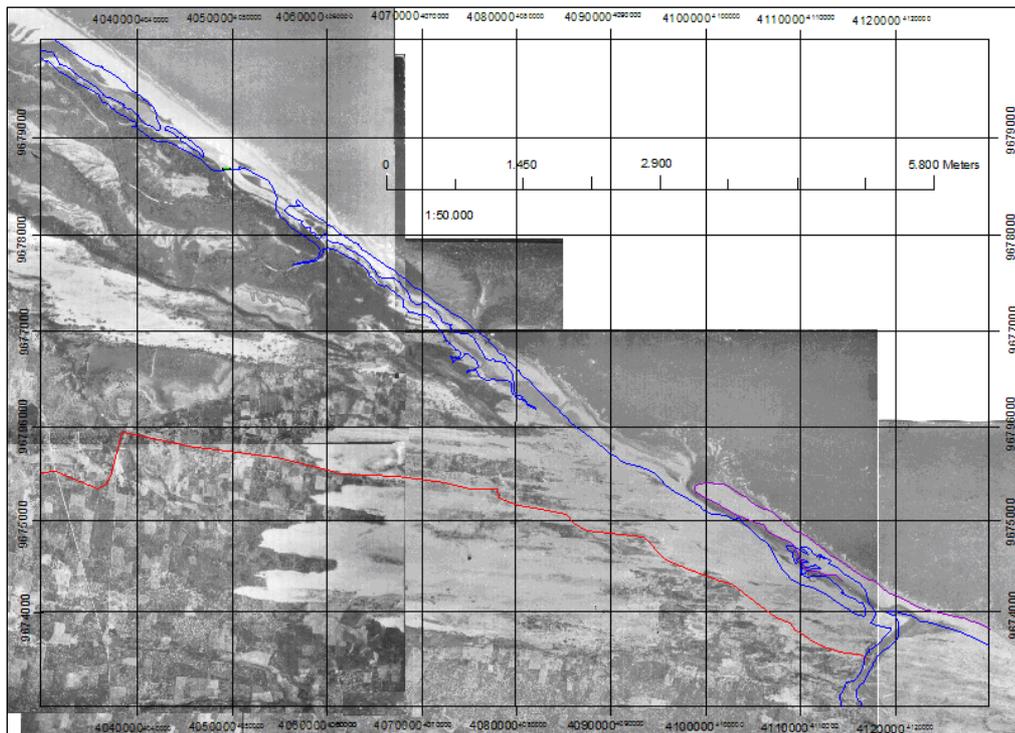


Figura 4. Mosaico de fotografias aéreas (1958) na PCA, com a delimitação da barra arenosa de Torrões, e a linha de costa de 1988 (em azul).

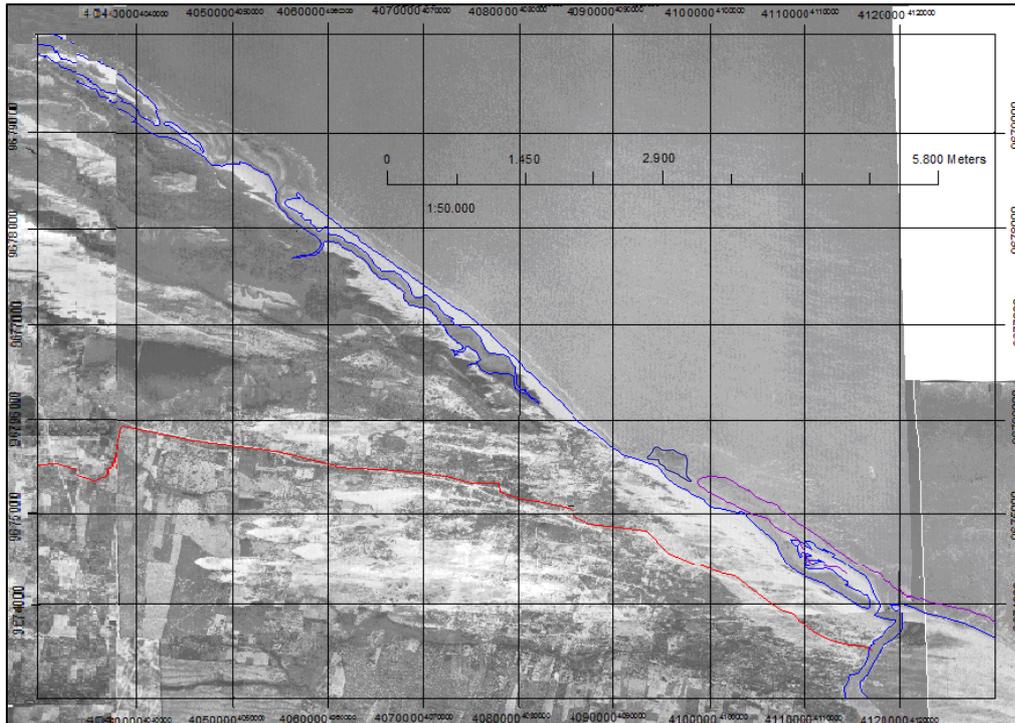


Figura 5. Mosaico de fotografias aéreas na PCA (1988) com a delimitação da linha de costa (em azul), e a erosão da barra arenosa de Torrões (1958/1988) (em lilás).

### 3.1.3 Variação morfológica da linha de costa na PCA em médio período (1958-2004)

Na PCA ocorreu uma retrogradação da linha de costa de  $-1314911,2 \text{ m}^2/46 \text{ anos}$  (1958/2004) ou  $-1,3 \text{ Km}^2$ , com recuo linear máximo de 785 m (Tabela 1), correspondendo a uma taxa de erosão média de 13,15 m/ano. O recuo foi mais expressivo no primeiro período (1958/1988) (Figura 6). A linha de costa progradou  $888045,47 \text{ m}^2/46 \text{ anos}$  e teve uma taxa de acresção média de 6,3 m/ano, com avanço máximo linear de 570 m.

A linha de costa da PCA retrogradou de 1958 à 1988 cerca de  $0,90 \text{ km}^2/30\text{anos}$  (69,9 %) com um recuo linear máximo de 410 m, e progradou nesse período  $0,40 \text{ km}^2/30\text{anos}$  (32 %), e um avanço máximo linear de 71 m.

A variação da linha de costa não é homogênea, o recuo máximo foi de 17 m/ano no extremo trecho oeste, entretanto o avanço máximo foi de 9,34 m/ano na PCA. A área de estudo foi subdividida em dois setores de acordo com os processos de formação e erosão das barras nas praias. A posição da linha de costa da PCA apresentou variações com o maior impacto erosivo nas primeiras décadas entre 1958 e 1988.

Tabela 1. Progradação e Retrogradação da linha de costa da PCA (1958-2004)

Processo	Progradação			Retrogradação (-)		
	área (m <sup>2</sup> )	linear (m)	%	área (m <sup>2</sup> )	linear (m)	%
Varição total						
1958/1988	199228,27	266	21,03	1030374,16	785	78,97
1988/2004	688817,15	570	68,75	342829,19	430	31,25
setor 1						
1958/1988	19805,59	71	5,30	356656,10	410	94,70
1988/2004	62940,35	250	51,90	58292,20	200	48,10
setor 2						
1958/1988	179422,68	195	21	673718,06	375	79
1988/2004	625876,80	320	68,70	284536,99	230	31,30

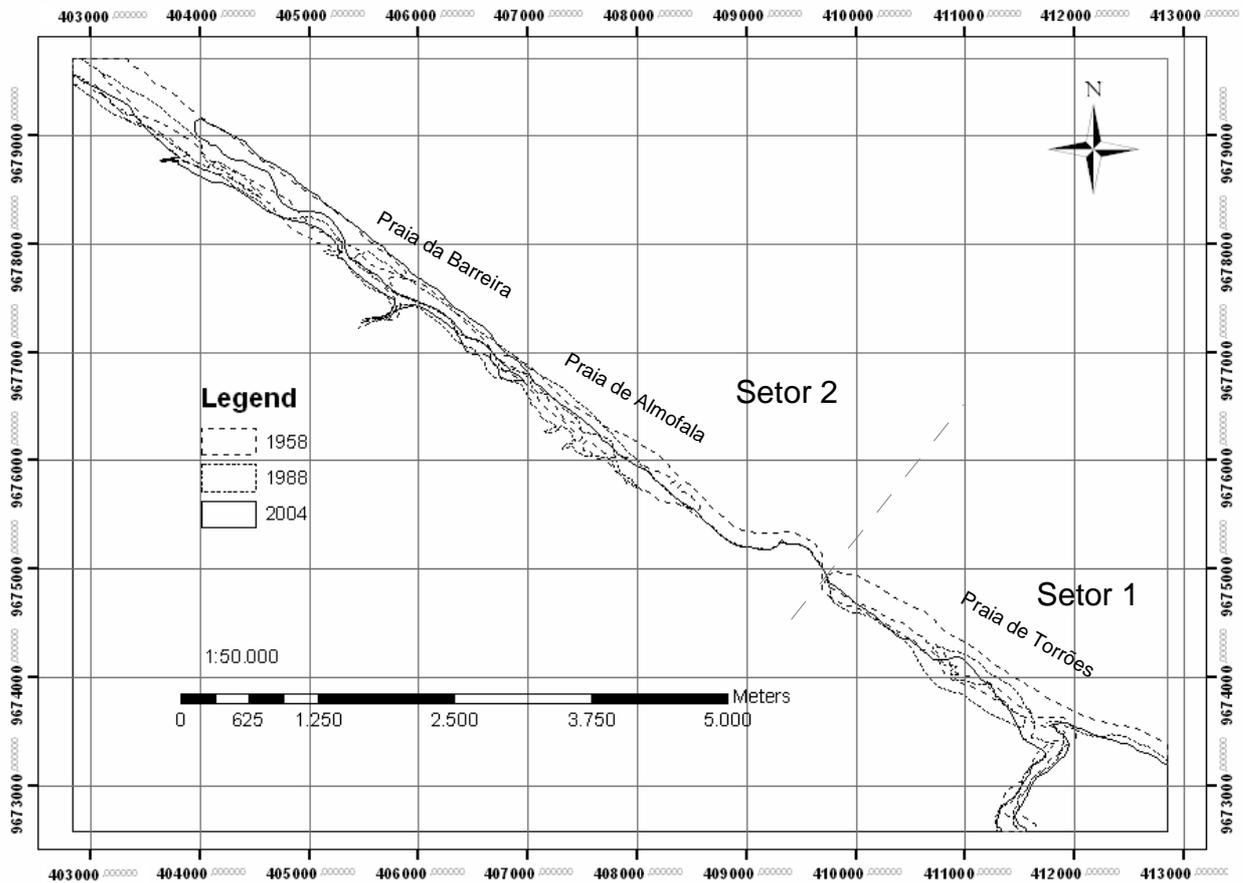


Figura 6. Mapa de variação da linha de costa na Planície costeira de Almofala (1958 - 2004).

No setor 1 (praia de Torrões) observou-se uma perda da linha de costa de -356656,1 m<sup>2</sup>/30anos (1958/1988) e um recuo linear máximo de 410 m (Tabela 1) na barra arenosa (Figura 5), e engorda de 19805,59 m<sup>2</sup>, com avanço linear máximo de 71 m (Tabela 1, Figura 7a). A linha de costa progradou 62940,35 m<sup>2</sup>/16anos (1988/2004) com um avanço de 250 m, e uma retrogradação de -58292,20 m<sup>2</sup>, recuando 200 m (48,1%) (Figura 7b).

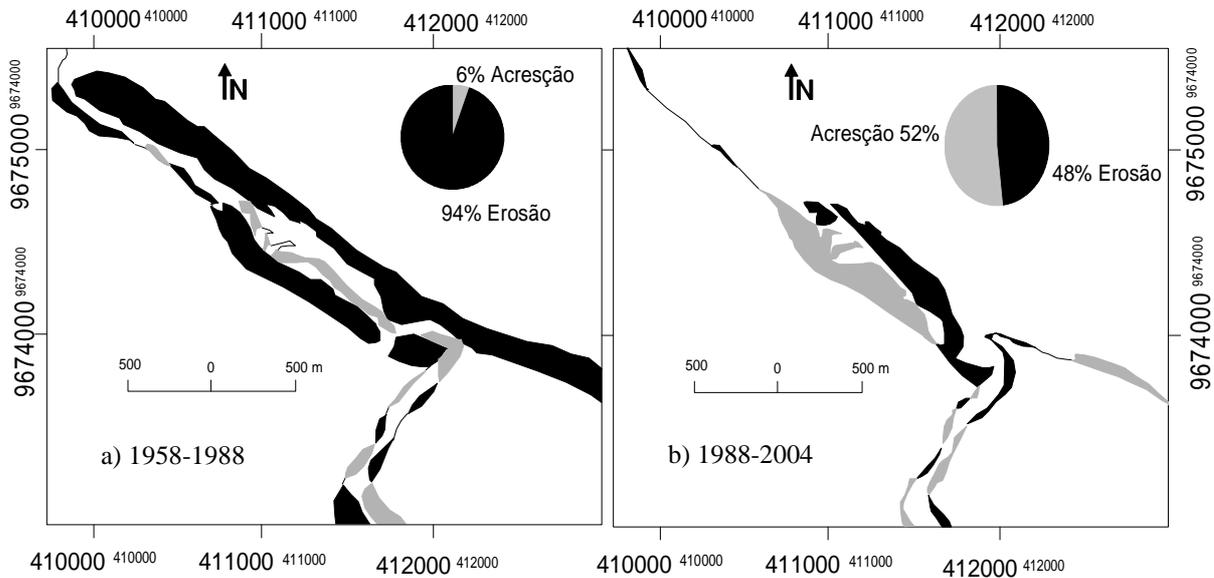


Figura 7. Mapa de retrogradação e progradação da linha de costa no setor 1: de 1958 à 1988 (a); e de 1988 à 2004 (b).

No setor 2 (linha de costa da praia de Almofala/Barreira) notou-se uma evolução dos processos progradação e retrogradação das barras interligados. Este setor teve uma perda de  $-673718,06 \text{ m}^2/30\text{anos}$  (1958/1988) com recuo linear máximo de 375 m. A LMA progradou cerca de  $179422,68 \text{ m}^2/30\text{anos}$  (Figura 8) com avanço linear máximo de 195 m. A alta retrogradação nesse período ocorreu nas barras de Almofala e no cordão litorâneo da praia da Barra a noroeste, que migrou para fora da área.

Neste mesmo setor 2 entre 1988/2004 ocorreu progradação da linha de costa de  $625876,80 \text{ m}^2/16\text{anos}$  e avanço linear máximo de 320 m. O cordão litorâneo da praia da Barreira engordou  $203331,50 \text{ m}^2$  a oeste. A linha de costa nesse período retrogradou  $284536,99 \text{ m}^2$  com recuo linear máximo de 230 m (Figura 9).

A integração da linha de costa das fotografias aéreas e das imagens orbitais através de *overlays*, interação e inserção de dados digitalizados nos aplicativos permitiram obter uma boa visão da evolução costeira, devido às escalas de detalhes.

A análise do erro em estudos de variação da linha de costa é essencial devendo-se realizar experimentos para obter uma boa acurácia (Crowell 1991). O erro cumulativo linear de 1958/1988 foi de 11,5 m, de 1988/2004 foi 9,3 m, enquanto o erro cumulativo de área foi de  $59,9 \text{ m}^2$  para o período de 1958/1988, e  $40,4 \text{ m}^2$  para o período de 1988/2004, sendo as menores distâncias lineares e áreas possíveis de serem mapeadas. Valores menores que estes, foram desconsiderados ou tratados como fora do limite de detecção dos sensores,

interpretando-se como trechos estáveis ou sem mudanças aparentes na delimitação da linha de costa da PCA.

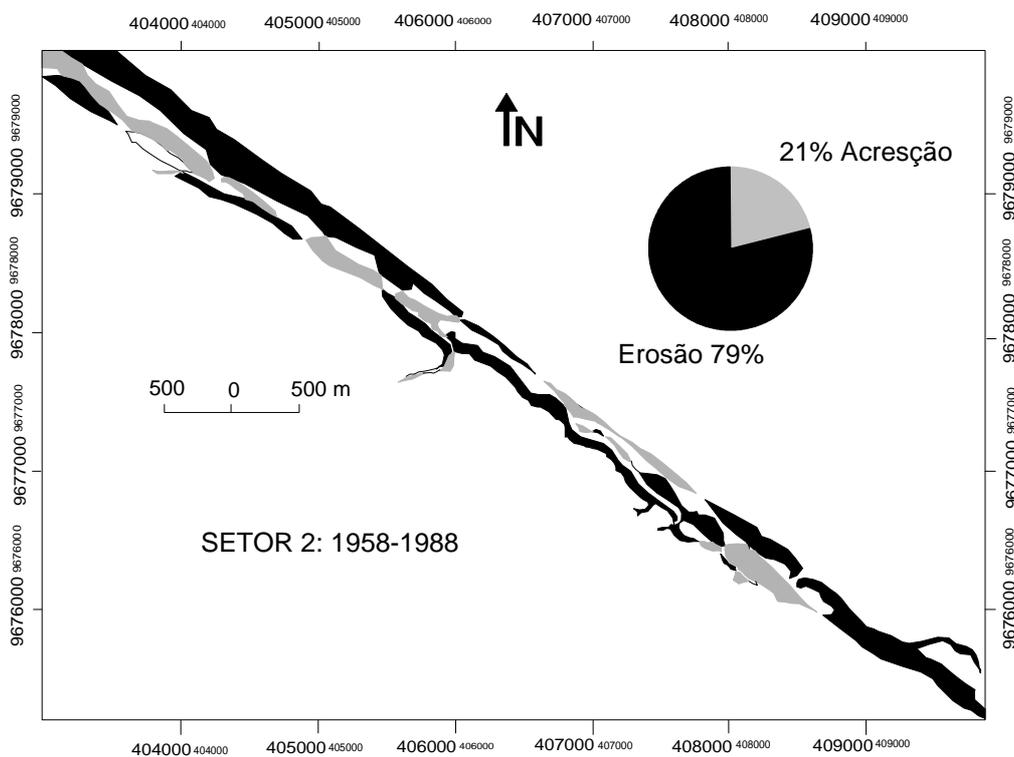


Figura 8. Mapa de retrogradação e progradação da linha de costa no setor 2 (1958 à 1988).

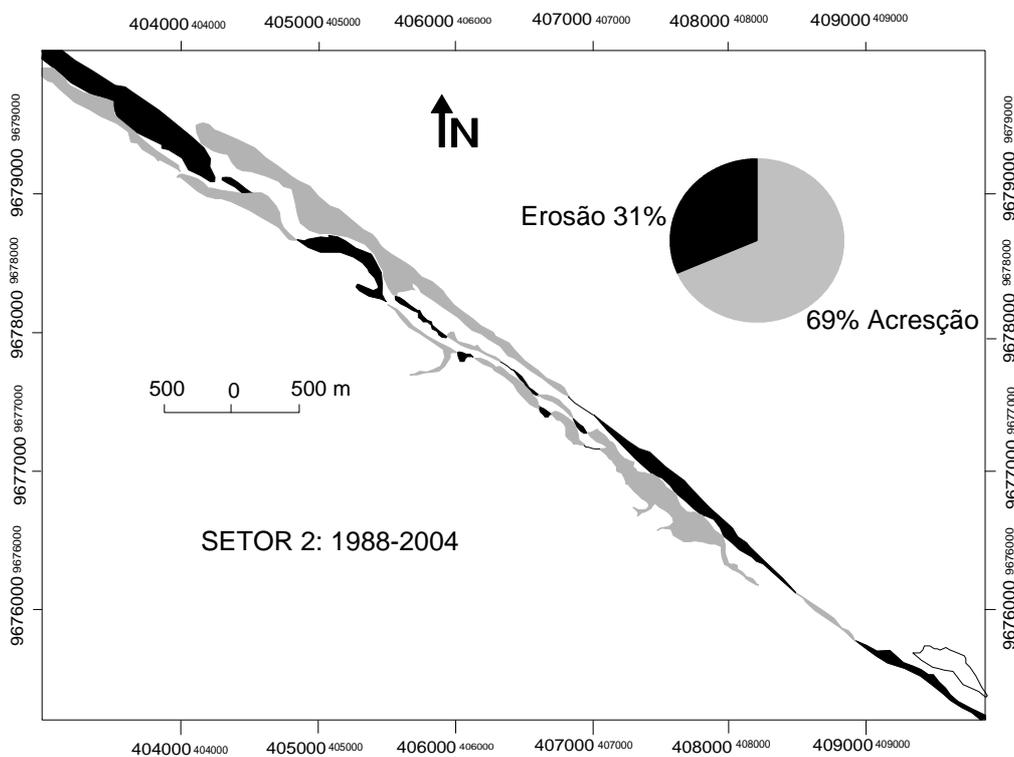


Figura 9. Mapa de retrogradação e progradação da linha de costa do setor 2 (1988 à 2004).

As Imagens Quickbird por serem ortoretificadas e de alta resolução (2,8 m), apresentaram um boa acurácia, na identificação de geoindicadores como escarpas de praia e plataforma de abrasão, neste artigo, que por sua vez foram úteis na delimitação e quantificação das variações da linha de costa.

Os geoindicadores tiveram uma boa acurácia nas fotografias aéreas (1958 e 1988), levando-se em conta sua escala, sendo úteis na análise multitemporal, mesmo apresentando um pouco mais de dificuldade na realização da delimitação dos geoindicadores. Os dados da interpretação visual das imagens e fotografias aéreas tiveram uma variância de 36,74%.

### 3.1.4 Impactos das mudanças morfológicas da linha de costa na PCA

Ocorreram muitas mudanças na linha de costa da PCA. Em 1958 a Praia de Almofala era constituída por uma barra no sentido NW e em 2004 essa barra não existia mais. Além disso, o cordão arenoso que iniciava na Praia de Torrões recobria parte da sua linha de costa, este barrava a foz do rio Aracatimirim, no sentido SE-NW, se estendendo por toda a praia, em 1988 foi observado um recuo dessa barra arenosa.

As praias da parte norte de Puri, central de Kendrapara, e sul de Bhadrak, na Índia (Kumar *et al.* 2010) com regime de meso-marés e valores de recuo da linha de costa menores que -10m/ano possuem alta vulnerabilidade aos riscos ambientais (erosão da linha de costa). Na praia de Salvaterra na ilha de Marajó (regime de meso a macro-maré) o recuo da linha de costa alcançou até 41 m/ano no período de 1995/1999 (França 2003) revelando altíssima vulnerabilidade aos riscos ambientais.

Na linha de costa da PCA o recuo médio da linha de costa foi de 13,15 m/ano com retrogradação de -1,3 Km<sup>2</sup>/46 anos (1958/2004) revelando praias com alta vulnerabilidade aos riscos ambientais. O avanço médio da linha de costa foi de 6,3 m/ano e a progradação de 888045,47 m<sup>2</sup>/46 anos, influenciada pelas anomalias La niña.

O taxa de recuo médio da linha de costa foi de 20 m/ano (1958/1988) na PCA, e de 14 m/ano (1988/2004). No entanto, a variação não se dá homogênea em toda a costa, com valores máximos de erosão de 25,22 m/ano na extrema costa oeste da praia da Barreira e na praia de Torrões, no primeiro período, e avanço da linha de costa de 6,5 m/ano na praia de Almofala (áreas de vulnerabilidade baixa).

Assim, observou-se que em 1988 na praia de Torrões a barra havia sido rompida, mudando o fluxo do rio, e o canal passou a seguir o curso direto para o mar. No período de

1958 à 1988, foi observado um maior recuo da linha de costa com retrogradação da barra, e da foz rio Aracatimirim.

Na parte noroeste da praia da Barreira (atual) ocorreu um recuo do cordão litorâneo da praia da Barra de 1958 a 1988, notando-se que atualmente desapareceu, tendo ocorrido uma migração do cordão para noroeste (Figura 8). Enquanto isso, na praia de Barreira o cordão litorâneo que media 2 km em 1958/1988 avançou para noroeste (1988/2004) alongando-se no sentido SE-NW medindo em 2004 3 km.

De 1988 à 2004 a barra da Praia de Almofala sofreu uma fusão com a linha de costa, progradou por suprimento de sedimentos e migrou para a costa, com fechamento de antiga calha de canal de maré. Em 2007 o paleo-mangue aflorou na praia de Almofala (Figura 10).

O cordão litorâneo da praia da Barreira, a noroeste da Praia de Almofala, sofreu significativa mudança (1988/2004), tendo migrado e ficado mais comprido, com fechamento de canal de maré, afogamento de mangue, por deposição de sedimentos na praia da Barreira.



Figura 10. Paleo-Mangue e sedimentos estuarinos soterrados por migração de cordão litorâneo na praia de Almofala.

A retrogradação da praia de Torrões entre 1958 a 1988 pode ter ocorrido por um prolongado e forte evento La niña entre 1984/1985 e 1985/1986 (Figura 11), que influenciou no aumento das chuvas com 2800 mm em 1985, e mais de 1800 mm em 1986 (Figura 12), aliada a um grande volume de chuvas em 1988 (Figura 12). Essas altas precipitações podem ter influenciado na forte vazão do rio Aracatimirim e aumentado os processos de erosão na sua foz no primeiro período entre 1958/1988.

Dois picos de maior precipitação no município de Itarema (Figura 13) em abril de 1985 e março de 1986 ultrapassaram 700 mm, em cada mês, coincidindo com o evento

prolongado de La niña (Figura 11), quando a TSM alcançou temperaturas abaixo  $-1^{\circ}\text{C}$ . Esses valores de precipitação são elevados se comparados aos valores históricos, a média total de 1172,21 mm (1977-2004) (Figura 12), mínima de 350 mm, e máxima de 2886 mm.

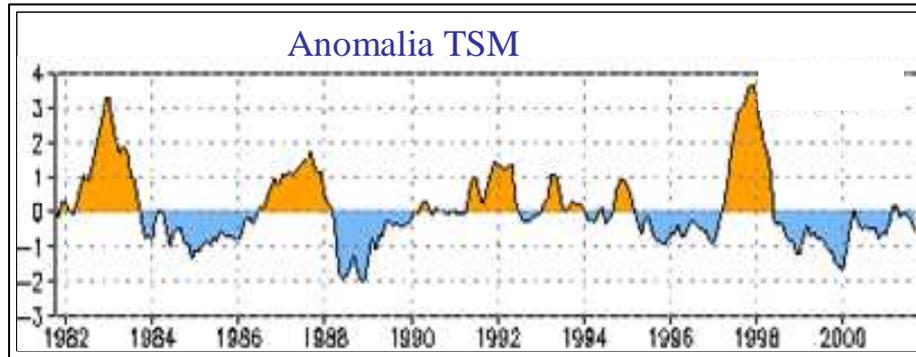


Figura 11. Anomalia TSM (1982 à 2000), no Pacífico Tropical (Fonte: CPTEC 2008).

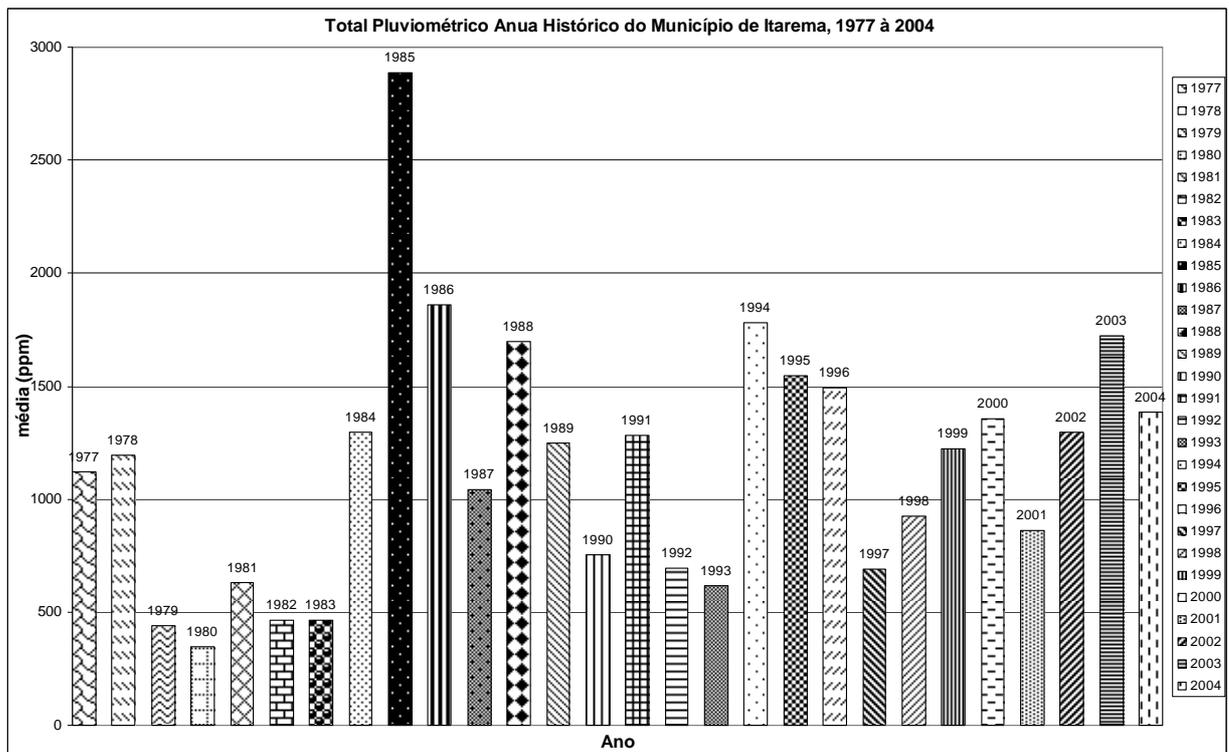


Figura 12. Totais pluviométricos históricos no município de Itarema, no período de 1977 à 2004 (Fonte: FUNCEME 2010).

A praia do Balneário Piçarras (Klein *et al.* 2009) e as praias do litoral do Rio Grande do Sul (Calliari *et al.* 2010) apresentaram “hotspots” relacionados a eventos extremos (as tempestades sazonais do meio do Atlântico e ciclones Extratropicais), responsáveis por erosões severas.

No estado do Ceará as tempestades do Atlântico Norte causam ressacas marinhas com erosões e impactos (destruição das construções) causados por altas ondas  $> 3$  m de altura. As

marés de sizígia contribuem com o aumento da altura das ondas quando há o alinhamento do sol, da lua e da Terra (FUNCEME 2010). Em 1985 tempestades com alturas de ondas de 4 m causaram grandes danos nas praias do Ceará, coincidindo com o evento La niña, as altas precipitações na PCA, e os altos valores de retrogradação na área (Figuras 7, 8, 11, 12, e 13).

Nas praias de Soure e Salvaterra, Ilha do Marajó, Pará (França & Souza Filho 2003) os deltas possuem grande magnitude, com migração da desembocadura do Canal do Pesqueiro de cerca de 179 m, à taxa de 19 m/ano, e maior sedimentação lamosa na quadra chuvosa. Na foz do Rio Aracatimirim na quadra chuvosa tem uma maior quantidade de siltes.

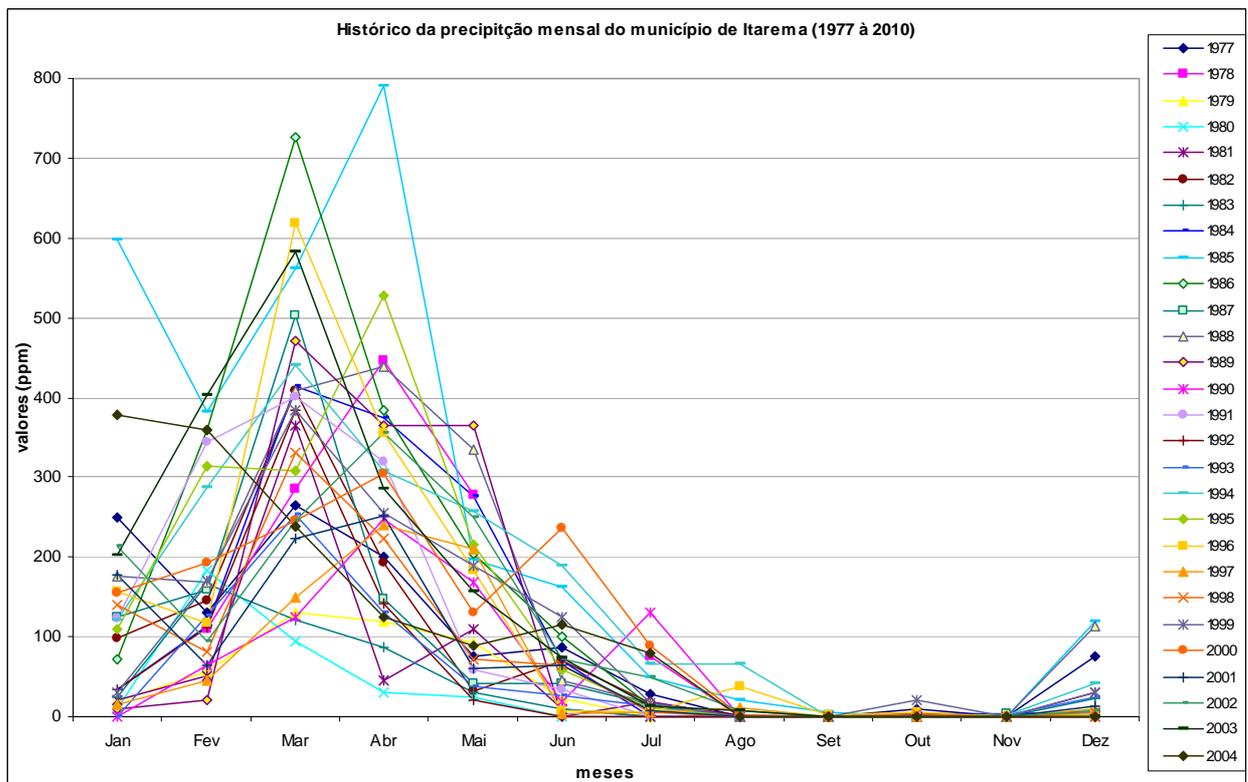


Figura 13. Precipitação histórica mensal no município de Itarema, 1977 à 2004 (Fonte: FUNCEME 2010).

### 3.1.5 Discussões

Nas últimas décadas, tem-se notado uma intensificação dos processos costeiros e aceleração das mudanças da linha de costa (Souza Filho 2000, Klein *et al.* 2001, Sales 2002; Carvalho 2003, França 2003, Pinheiro *et al.* 2006, Chen *et al.* 2005, Chu *et al.* 2006; Calliari *et al.* 2010, Cowart *et al.* 2010, Farias & Maia 2010). Nas últimas décadas o recuo da linha de costa e o aumento dos processos de erosão formam “hot spots” ou zonas de erosão acentuadas na praia do Balneário de Piçarras com taxas de erosão maiores que 5m/ano (Klein *et al.*

2009). As altas taxas de retrogradação da linha de costa (<-10m) definem as praias da PCA como de alta vulnerabilidade aos riscos ambientais (por erosão).

A Ilha de Cedar, norte de Carolina (Cowart *et al.* 2010) apresenta erosão em 88% da sua linha de costa (1958-1988). Estudos recentes da evolução da linha de costa na praia do Farol em Itarema (Farias & Maia 2010) constataram caráter erosivo na praia, com valor médio de 3,4 m/ano, e máximos de 8,8 m/ano, 6,1 m/ano e 10,9 m/ano, sendo uma das áreas mais críticas com retrogradação da costa cearense. A praia Mansa no porto do Mucuripe apresenta um avanço da linha de costa de 0,8284 km<sup>2</sup>/31 anos (1972/2003) com predomínio dos processos de progradação (Pinheiro & Morais 2007).

A linha de costa na PCA apresenta zonas de erosão acentuada (hot spots) do estado do Ceará, mais expressivas nas praias de Torrões e da Barreira com valores médios de recuo da linha de costa de 395 m, máximos de 700m, e uma taxa de erosão média de 13,15 m/ano, que as definem como de alta vulnerabilidade aos riscos ambientais. A direção de alongamento das barras na PCA, com características de recuo da linha de costa, está ligada às direções de ventos e ao sentido da deriva litorânea, para noroeste.

A menor mudança verificada no recuo da linha de costa na praia de Almofala (1988 à 2004) está relacionada a uma morfologia com plataforma de abrasão marinha (arenito da Formação Barreiras), funcionando como uma barreira de proteção para os processos de erosão. Essa plataforma de abrasão ocorre pela inflexão que existe na região de Acaraú/Itarema (Silva Filho 2004) que a mantém mais estável. Nesse sentido, a parte leste da Praia de Almofala possui baixa vulnerabilidade aos riscos ambientais.

As praias da PCA são caracterizadas por eolianitos em forma de escarpas de praias, que já encontravam-se em solapeamento na década de 80 (Freire 1989). À leste do rio Aracatimirim sua foz era barrada por um cordão litorâneo em 1958, voltado para oeste. Atualmente, sua foz encontra-se em contato direto com o oceano, e as escarpas de praia continuam sofrendo solapeamento.

Os impactos gerados pela dinâmica natural na PCA em 46 anos apresentaram-se através da progradação e retrogradação, com afogamento e soterramento de manguezais, destruição de casas e barracas na praia de Torrões, além de migração de canais de maré e fluxo de rio, sendo que, o maior recuo da linha de costa ocorreu principalmente no primeiro período/30anos (1958/1988), e o avanço no segundo período/16anos (1988/2004).

### 3.1.6 Conclusões

Observou-se na linha de costa da PCA uma maior quantidade de processos erosivos, com conseqüente retrogradação, mais bem notados no primeiro período/30anos (1958/1988), enquanto os processos acrecionais, com progradação da linha de costa ocorreram no segundo período/16anos (1988/2004).

As escarpas de praia e a plataforma de abrasão da PCA são excelentes geoindicadores na delimitação e quantificação das variações da linha de costa, nas fotografias aéreas com bom nível de detalhes, e principalmente nas imagens Quickbird, resultando em alto nível de detalhes.

### 3.1.7 Referências bibliográficas

- Aguiar P. F. 2005. *Zoneamento Geoambiental no Litoral Leste do município de Beberibe – CE*. Dissertação de Mestrado. Pós-Graduação em Geologia, Departamento de Geologia. Universidade Federal do Ceará, 157p.
- Barale V. & Folving, S. 1996. Remote sensing of coastal interactions in the Mediterranean region. *Ocean & Coastal Management*, 30 (2-3): 217-233.
- Berger A. R. 1996. *The geoindicator concept and its application: an introduction*. In: R.B. Antony & J.I William J. Iams (ed.). *Geoindicators: assessing rapid environmental changes en earth systems*. Rotterdam, A. A. Balkema. p. 1-14.
- Brito J. L. N. S. & Filho, L. C. T. C. 2002. *Fotogrametria Digital*. Instituto Militar de Engenharia.
- Calliari L. J., Guedes R. M. C., Pereira P. S., Lélis R. F., Antiquiera J. A., Figueiredo S.A. 2010. Perigos e riscos associados a processos costeiros no litoral sul do Brasil (RS): uma síntese. *Braz. J. Aquat. Sci. Technol.*, 14 (1): 49-61.
- Chen S., Chen L., Liu Q., Li X., Tan Q. 2005. Remote sensing and GIS-based integrated analysis of coastal changes and their environmental impacts in Lingding Bay, Pearl River Estuary, South China. *Ocean & Coastal Management South China*, 48: 65-83.
- Chu Z. X., Sun X. G., Zhai S. K., Xu K. H. 2006. Changing pattern of accretion/erosion of the modern Yellow River (Huanghe) subaerial delta, China: Based on remote sensing images. *Marine Geology*, 227 (1/2): 13-30. doi:10.1016/j.margeo.2005.11.013
- Camara G. & Medeiros J. S. 2000. *Introdução à Ciência da Geoinformação*. São José dos Campos: INPE.

- Carvalho A. M. 2003. *Dinâmica costeira entre Cumbuco e Matões, costa noroeste do Estado do Ceará*. Ênfase nos processos eólicos. Tese de Doutorado, Curso de Pós-Graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 194 p.
- SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - CPRM. 2003. *Atlas de geologia e Recursos minerais do Ceará: Sistemas de Informações Geográficas - SIG*. Mapas na escala 1:500.000. Brasil: CPRM, Fortaleza: CNPQ, ICD-Rom.
- CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS - CPTEC. 2008. *El niño e La niña*. [http://www.cptec.inpe.br/enos/Oque\\_el-nino.shtml](http://www.cptec.inpe.br/enos/Oque_el-nino.shtml). Acesso em: 08 de janeiro de 2008.
- Cowart L., Wals J. P., Corbett D. R. 2010. Analyzing Estuarine Shoreline Change: A Case Study of Cedar Island, North Carolina. *Journal of Coastal Research*. 26: 817-830.
- Crowell M., Leatherman S. P., Buckley M. K. 1991. Historical shoreline change: error analysis and mapping accuracy. *Journal of Coastal Research*, 7: 839-852.
- DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO - DHN. 2007. Marés. *Portal da Diretoria de Hidrografia e Navegação*, Niterói, RJ, Brasil. Disponível em <https://www.mar.mil.br/dhn/chm/mares.html> (Acessado em: 5 de Janeiro de 2007).
- El-Robrini M. 1995. *Evolução Geológica da Plataforma Continental Norte durante o Quaternário (Pleistoceno/Holoceno)*. PROGRAMA REVIZEE/NO. V Simpósio de Geologia da Amazônia, Belém, SBG/ NO, p. 19-20
- Farias E. G. G. & Maia L. P. 2010. Uso de Técnicas de Geoprocessamento para a Análise da Evolução da Linha de Costa em Ambientes Litorâneos do Estado do Ceará, Brasil. UNIVALE. *Journal of Integrated Coastal Zone Management*. 1: 1-23.
- Fernandes A. 2000. *Fitogeografia Brasileira*. Fortaleza: Multigraf. 340p.
- FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS - FUNCEME. 2010. *El Niño e La Nina; Boletins Meteorológicos*. In: Meteorologia e Oceanografia. Fortaleza: FUNCEME. <http://www.funceme.br/DEMET/index.htm>. Acesso em: 04 de dezembro de 2010.
- Forbes D. L. & Livernam D. G. E. 1996. *Geological indicators in the coastal zone*. In: Berger, A. R. and Iams, W. J. (eds.) *Geoindicators: assessing rapid environmental changes in earth systems*. Rotterdam, Balkema. p. 175-192.
- França C. F. 2003. *Morfologia e mudanças costeiras da margem leste da Ilha de Marajó (PA)*. Tese de Doutorado. Centro de Geociências. Universidade Federal do Pará. Belém: UFPA. 144p.
- Freire G. S. S. 1989. *Edute hydrologique et sedimentologique de l'estuarie du rio Pacoti (Fortaleza, Ceará, Brasil)*. Nantes: Université de Nantes Faculte des Sciences et des Techniques. (These du Doctorat). 300p.

- Jensen J. R., Ramsey E. W., Holmes J. M., Michel J. E., Savitsky B., Davis B. A. 1990. Environmental sensitivity index (ESI) mapping for oil spills using remote sensing and geographic information system technology. *International Journal of Geographical Information Systems*, 4 (2): 181-201.
- Jensen J. R., Narumalani S., Weatherbee O., Murday M., Sexton W. J., Green C. J. 1993. Coastal environmental sensitivity mapping for oil spills in the United Arab Emirates using remote sensing and GIS technology. *Geocarto International*, 2: 5-13.
- Klein R. J. T., Nicholls R. J., Ragoonaden S., Capobianco M., Astoni J., Buclde E. N. 2001. Technological options for adaptation to climate change in coastal Zones. *Journal of Coastal Research*. Florida: Summer, 3: 531-543.
- Klein A. H. F., Benedet Filho, L., Hsu J. R. C. 2003. Stability of headland bay beaches in Santa Catarina: a case study. In: Klein, A. H. F., Finkl, C. W., Rörig, L. R., Santana, G. G., Diehl, F. L. and Calliari, L. J. (eds), *Journal of Coastal Research*, Special Issue, Proceedings of the Brazilian Symposium on Sandy Beaches: Morphodynamics, Ecology, Uses, Hazards and Management, 35: 151-166.
- Klein A. H. F., Araujo R. S., Polette M., Sperb R. M., Freitas D., Camargo J. M.; Sprovieri, F.C.; Pinto, F.T. 2009. *Ameliorative Strategies at Balneário Piçarras Beach – Brazil*. In: Williams, A.T. and Micallef, A. (ed). *Beach Management Guidelines: Principles and Practice*. Earthscan Publisher, London, UK. 241-255.
- Kumar T. S., Mahendra R.S., Nayak S., Radhakrishnan K., Sahu K.C. 2010. Coastal Vulnerability Assessment for Orissa State, East Coast of Índia. *Journal of Coastal Research*, West Palm Beach, Florida. 26 (3): 523–534. DOI: 10.2112/09-1186.1
- Li R., Deshpande S., Niu X., Lee I-C., Wu B. 2008. Multi-dimensional geospatial data integration for coastal change analysis. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Beijing, XXXVII (8): 1311-1316.
- Maia L. P. 1998. *Processos costeiros y balance sedimentario a lo largo de Fortaleza (NE – BRASIL): Implicaciones para una gestión adecuada de la zona litoral*. Tese de Doutorado. Universidade de Barcelola, Barcelona-ES. 269p.
- Maia L.P. & Cavalcante. 2005. *Mapeamento das Unidades Geoambientais da Zona Costeira do Estado do Ceará*. Programa Zoneamento Ecológico-Econômico da Zona Costeira do Estado do Ceará. Fortaleza: SOMA/ SEMCE/ LABOMAR. 226 p.
- Morais J. O., Souza M. J. N., Coutinho P. N. 1975. *Contribuição ao Estudo geomorfológico-sedimentológico do litoral de Beberibe (Ceará-Brasil)*. Fortaleza: Arq. Ciência do Mar. 15 (2): 71-78.
- Morais J. O. 1996. Processos e Impactos Ambientais em Zonas Costeiras- Geologia do Planejamento Regional. *Revista de Geologia*. Fortaleza: UFC. 9: 191-242.
- Pinheiro L. de S., Gomes M. L., Falcão T. O., Morais J. O. 2006. *A Influência dos Processos Estuarinos na Morfodinâmica e Vulnerabilidade a Erosão da Prainha de Aquiraz-(Ce)*.

Goiânia: VI Simpósio Nacional de Geomorfologia/Regional Conference on Geomorphology.

- Pinheiro L. S. & Morais J. O. 2007. Shoreline Change of the Mucuripe Harbour Zones (Fortaleza-Ceará, Northeast of Brazil) 1972 – 2003. Australia: *Journal of Coastal Research*. Special Issue 50 (50): 1163 – 1167.
- Silva M. G. L. da. S. 2001. *Avaliação Multitemporal da Dinâmica Costeira da Praia do Pescador, Bragança (norte do Brasil)*. EL-ROBRINI, M. (Docente). Mestrado em Geologia. Universidade Federal do Pará. Belém: UFPA. 113 p.
- Short A .D. & Trembanis A. C. 2004. Decadal scale patterns in beach oscillation and rotation Narrabeen Beach, Australia-time series, PCA and wavelet analysis. *Journal of Coastal Research*, 20 (2): 523–532. Disponível em <http://www.jstor.org/stable/4299308>.
- Suguio K., Flexor J. M., and Azevedo A. E. G. 1986. *Quaternary sedimentary deposits in the states of Paraná and Santa Catarina coastal plains*. In: RABASSA, J. ed. Quaternary of South America and Antarctic Peninsula. Rotterdam A A Baltimor. 4: 3-25.
- Sales V. C. C. 2002. *Évolution Géomorphologique de la Zone Côtière le L'état du Ceará, Nord-Est Du Brésil: du Long Terme au Court Terme*. Tese de Doutorado. Paris: Université Paris-Sourbonne. 513 p.
- Souza Filho P. W. M. 2000. *Mangrove as Geological Indicator of Coastal Changes in Bragança, Pará, Northern Brazil*. Mangrove Conference, Recife, Full Papers, CDROM.
- Souza Filho P. W. M. & El-Robrini M. 2000. Coastal Zone Geomorphology of the Bragança Area, Northeast of Amazon Region, Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, 30: 518-522.
- Souza Filho P.W.M. & Paradella W.R. 2002. Recognition of the main Geobotanical Features in the Bragança Mangrove Coast (Brazilian Amazon Region) from Landsat TM and RADARSAT-1 data. *Wetlands Ecology and Management*, 10: 123-132.
- Thieller E. R., Martin D., Ergul A. 2005. The Digital Shoreline Analysis System, version 2.3. *Shoreline change measurement software extension ArcMap 9.0. USGS Open-File*. Disponível em <http://woodshole.er.usgs.gov/project-pages/dsas/>
- Trebossen H., Deffontaines B., Classeau N., Kouame J., Rudant J.P. 2005. Monitoring coastal evolution and associated littoral hazards of French Guiana shoreline with radar images. *Comptes Rendus Geosciences*, 337(13):1140–1153. doi: 10.1016/j.crte.2005.05.013
- Yoshikawa S. & Nemoto K. 2010. Seasonal variations of sediment transport to a canyon and coastal erosion along the Shimizu coast, Suruga Bay, Japan. *Marine Geology*, 271: 165-176. doi:10.1016/j.margeo.2010.02.010

### 3.2 VARIABILIDADE MULTITEMPORAL DA LINHA DE COSTA EM MÉDIO PERÍODO (1977-2010) UTILIZANDO IMAGENS DO SATÉLITE LANDSAT NA PLANÍCIE COSTEIRA DE ALMOFALA, CEARÁ, NORDESTE DO BRASIL<sup>3</sup>

#### **Shoreline multitemporal variability in mid-term (1977-2010) using Landsat satellite images to Almofala coastal plain, Ceara, Northeastern Brazil**

##### **Resumo**

A linha de maré alta (LMA) apresentou na sua posição mudanças morfológicas em período médio (1977-2010) na planície costeira de Almofala. A área inclui as praias de Almofala, da Barreira e de Torrões, influenciadas por altas temperaturas ( $>20^{\circ}\text{C}$ ), pluviometria média de 1195,36 mm (1977-2010), velocidade média dos ventos de 5,5 m/s, regime de meso-marés (1,48m), ondas com altura significativa de 0,56 m, e corrente longitudinal direcionada para noroeste. A metodologia consistiu na: (1) aquisição de imagens multitemporais do satélite Landsat (1977-2010); (2) ortorretificação das imagens; (3) interpretação visual das imagens Landsat para mapeamento da variação da linha de costa, e das zonas de progradação e retrogradação, na escala 1:100.000. Os resultados mostraram as variações da posição da linha de costa em médio período (33 anos - 1977-2010):  $-0,98 \text{ km}^2$  (72,46%) de retrogradação (reco linear máximo de 404 m), e  $0,37 \text{ km}^2$  (27,5 %) de progradação (avanço linear máximo de 264 m).

**Palavras chaves:** linha de maré alta (LMA); médio período; sensoriamento remoto

##### **Abstract**

The spring high tide level (SHTL) showed itself position mid-term morphological changes from 1977 to 2010 in Almofala coastal plain. This area include Almofafa, Barreira and Torroes Beachs, influenced to high temperatures ( $>20^{\circ}\text{C}$ ), media raining of 1195,36 mm (1977-2010), velocity media winds of 5,5m/s (2007), mesotidal coast (1,48 m), height waves of 0,56 m and longshore current with direction NW. The methodology consisted: (1) collection of multi-temporal images of the Landsat satellite (1977-2010) (2) ortho-retification of images; (3) visual interpretation of the Landsat images by mapping of coastal line changes, progradation and retrogradation zones mapping, in scale 1:100000. The resultes showed the mid-term changes in shoreline position (33 years - 1977-2010):  $-0,98 \text{ Km}^2$  (72,46%) of retrogradation (linear retreat maximum of 404 m), and  $0,37 \text{ km}^2$  (27,5 %) of progradation (linear addition maximum 264 m).

**Key words:** spring high tide level (SHTL); mid-term; remote sensing

<sup>3</sup> Artigo submetido na Revista Brasileira de Geociências em 24 de março de 2011. Autores: Ponciana Freire de Aguiar <sup>1</sup> (UFPA), Prof. Dr. Maamar El-Robrini <sup>2</sup> (UFPA) e Prof. Dr. George Satander Sá Freire <sup>2</sup> (UFC).

### 3.2.1 Introdução

A presente pesquisa é uma análise da dinâmica da planície costeira de Almofala (PCA) (município de Itarema, Ceará) através do monitoramento da posição da linha de maré alta (LMA) em médio período (1977-2010) para o entendimento das mudanças morfológicas na área. Os processos de erosão predominam na área, com um significativo recuo da linha de costa, bem como a formação de “hot spots”.

Os fatores climáticos, oceanográficos, sedimentológicos, de oscilações do nível relativo do mar, neotectônicos e antrópicos condicionam a PCA (que inclui as praias de Almofala, da Barreira e de Torrões) caracterizada por altas temperaturas ( $>20^{\circ}\text{C}$ ), pluviometria média de 1195,36 mm (1977-2010), velocidade média dos ventos de 5,5 m/s (2007), regime de meso-marés (1,48 m), e altura significativa das ondas de 0,56 m (2007).

A adoção de estudos que visem determinar as taxas de recuo da linha de costa da planície costeira de Almofala constitui uma ferramenta essencial para a correta tomada de decisões acerca do uso e ocupação adequados, e do gerenciamento costeiro da área.

As mudanças naturais na planície costeira ocorrem por processos de erosão, transporte e sedimentação que agem nos substratos rochosos e depósitos (Souza Filho & El Robrini 2000, Short & Trembanis 2004), pela vegetação, cursos de rios, ventos, marés, ondas e correntes e eventos extremos (anomalias TSM, tempestades, e ressacas de mar) (McNinch 2004, Li *et al.* 2008, Siegle & Calliari 2008, Klein *et al.* 2009 e Callaghan *et al.* 2009).

As tempestades e ciclones de grande energia (ventos e ondas fortes) remobilizam altos volumes de sedimentos em praias do sul do Brasil, aumentam o recuo da linha de costa e formam zonas de erosão acentuada ou “hot spots” (Siegle & Calliari 2008, Klein *et al.* 2009, Pianca *et al.* 2010), áreas com alta vulnerabilidade aos riscos ambientais (Kumar *et al.* 2010).

Na costa norte do Brasil, a aceleração dos processos de erosão costeira está relacionada a eventos como El Niño e La Niña (Souza Filho 2000) que periodicamente influenciam no aporte de sedimentos dos rios. As ressacas do mar no litoral cearense, geradas nas marés de sizígia (alinhamento do sol, da lua e da Terra) e influenciadas por tempestades do Atlântico Norte, causam impactos negativos como: inundações periódicas, destruição de construções e remobilização das populações (Pinheiro *et al.* 2006, FUNCEME 2010).

A avaliação da posição da linha de costa, quantificação e cálculo de áreas de progradação e retrogradação vêm sendo realizados em diversos trabalhos (Barale & Folving 1996, Souza Filho 2000, Chen *et al.* 2005, Trebossen *et al.* 2005, Marfai & Almohammad

2008) através do uso de integração de dados e imagens de sensores remotos em Sistema de Informações Geográficas (SIG's).

Estudos sobre a dinâmica costeira com uso de imagens Landsat foram observados no Brasil: Geomorfologia da zona costeira de Bragança (Souza Filho & Paradella 2002); Morfologia e mudanças costeiras da margem leste da Ilha de Marajó (França 2003); Gerenciamento e morfologia costeira (Samat *et al.* 2005); Uso de RADARSAT-1 Fine Mode and Landsat-5 TM componente principal seletivo em análises de mapeamento geomorfológico de manguezais de macromarés da costa da Região Amazônica (Souza Filho & Paradella 2005); Uso de técnicas de geoprocessamento na análise da evolução da linha de costa em ambientes litorâneos do Ceará, Brasil (Farias & Maia 2010).

As praias da Caponga e Itarema apresentaram altos valores de erosão das barras arenosas nos estudos de Sales (2002). A praia Mansa em Fortaleza (Pinheiro & Morais 2007) vem apresentando processos de acreção da linha de costa. Na praia do Farol (município de Itarema) a linha de costa analisada por Farias & Maia (2010) utilizando imagens Landsat, apresentou caráter erosivo crítico, com valores médios de 3,4m/ano e máximos de 8,8m/ano, 6,1m/ano e 10,9m/ano.

Neste sentido, o sensoriamento remoto foi fundamental no estudo da variabilidade multitemporal da linha de costa da planície costeira de Almofala, na criação de uma base cartográfica, na modelagem das variações espaciais, e identificação de zonas de erosão acentuadas integrados em Banco de Dados Geográficos (BDG) (Jensen *et al.* 1993, 1998).

A interpretação visual das imagens Landsat (1977-2010), na escala de 1:100.000, conforme os cálculos de margem de erros (Dolan *et al.* 1980, Crowell *et al.* 1991, Souza Filho 2000, França 2003, França & Souza Filho 2003, Carmona *et al.* 2004, Souza Filho 2005, Yoshikawa *et al.* 2010) possibilitou a delimitação da posição da linha de maré alta (LMA) da PCA, dentro de limites mínimos lineares e de áreas de cada ano: 50.65 m ou 1847.10 m<sup>2</sup>, 43.27 m ou 1404.21 m<sup>2</sup>, 33.15 m ou 670.34 m<sup>2</sup>, e 32.33 m ou 679.39 m<sup>2</sup>, para os períodos de 1977/1983, 1983/1988, 1988/2003, 2003/2010, respectivamente.

### **3.2.1.1 Localização e caracterização geográfica na PCA**

A PCA (Figura 1) localiza-se no município de Itarema, Ceará, Nordeste, Brasil (coordenadas UTM: X1: 403500 E, 9673000N, X2: 412500E, 9680000N), e limita-se ao sul com o distrito de Carvoeiro, ao norte e nordeste com o Oceano Atlântico, a sudeste com o distrito de Patos, e a oeste com a praia da Barra, distando 185 Km de Fortaleza.

A PCA possui um clima tropical chuvoso e quente (Ayoade 1996), com temperaturas  $>20^{\circ}\text{C}$ . As chuvas concentram-se entre janeiro e abril, com média pluviométrica é 1195,36 mm (1977-2010), mínima de 350 mm e máxima de 2886 mm (FUNCEME 2010). Os ventos têm velocidade média de 5,5 m/s, com direção preferencial de E.

Os aspectos oceanográficos incluem um regime de meso-marés com altura média de 1,48 m e altura significativa das ondas de 0,56 m. A corrente longitudinal é direcionada para NW, que juntamente com a direção dos ventos e da deriva litorânea, caracterizam a direção de alongamento das barras arenosas na PCA. A hidrografia caracteriza-se por um rio perene, o Aracatimirim, com padrão dendrítico e paralelo, e por córregos intermitentes.

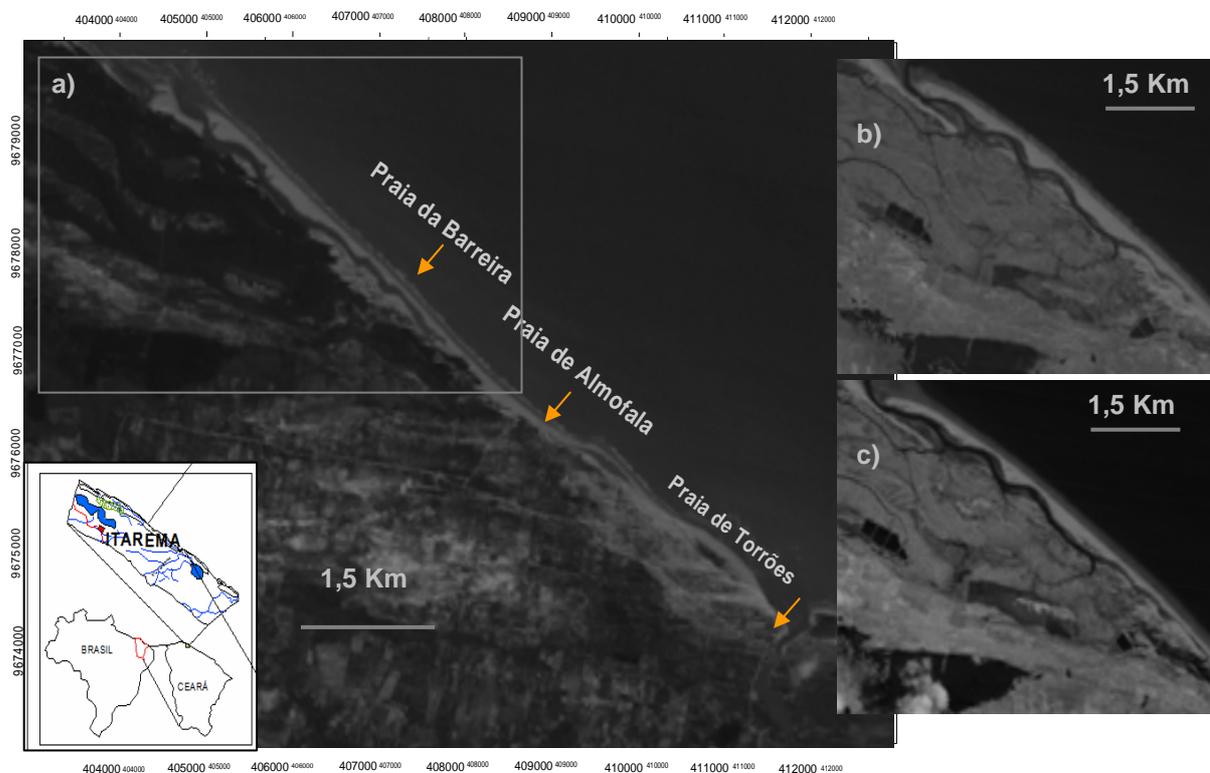


Figura 1. Mapa de localização da Planície Costeira de Almofala (a); com mudanças do cordão litorâneo nas imagens Landsat de 1988 (a); 2003 (b) e 2010 (c).

A cobertura vegetal na PCA inclui: a mata de tabuleiro sobre o planalto costeiro; a mata ciliar no Lagamar do Sargento; a vegetação de dunas sobre as planícies arenosas e eólicas; e o manguezal que recobre as planícies estuarinas (Fernandes 2004).

Na PCA, afloram duas grandes unidades geológicas: a Formação Barreiras (Mioceno/Plioceno), e os Depósitos Quaternários (Holoceno) (Carvalho 2003, e CPRM 2003). Estas unidades geológicas estão instaladas numa margem passiva, onde ocorrem: uma

falha inferida com orientação NE-SW na área continental, e falhas normais (E-W) na plataforma continental interna.

As mudanças na morfologia costeira de médio período são progressivas segundo Souza Filho (2000), e correspondem a tendências acumulativas, envolvendo períodos de dezenas a milhares de anos, significando fases retrogradacionais ou progradacionais.

O relevo na PCA (Sales 2002, Maia & Cavalcante 2005) apresenta duas grandes unidades geomorfológicas: (a) O Planalto Costeiro constituído por tabuleiros litorâneos com um modelado de aplanamento, correspondente a uma superfície pediplanada; e (b) A Planície Costeira com um modelado de acumulação, constituindo as planícies aluviais, planície lagunar, planícies estuarinas e planícies arenosas (cordões arenosos de praias e de dunas).

### **3.2.2 Metodologia**

A metodologia constituiu em estudo descritivo e explicativo, com fichamento das leituras realizadas, incluindo uma reavaliação sistemática da bibliografia pré-existente. Conjuntamente, se realizou a aquisição de documentação cartográfica da área, com produtos de sensoriamento remoto (imagens Landsat em estado bruto, de 1977 a 2010).

Foram realizados dois trabalhos de campo na PCA: (1) dias 11 e 12/05/2007 para reconhecimento de áreas, identificação de unidades e subunidades geomorfológicas da área, além de coletas de pontos (X, Y e Z) com DGPS; (2) dias 24 e 25/11/2007 para comprovação de dados e mapeamentos.

#### **3.2.2.1 Coletas de pontos topográficos**

As imagens Landsat adquiridas em estado bruto foram ortorretificadas. Para isso, foram coletados pontos de alta precisão (X, Y e Z) aleatórios na PCA, utilizando o método “stop” and “go” para o par de DGPS. O erro foi menor que 0,5 m. Os valores de altitude foram utilizados na ortorretificação das imagens, num total de 40 pontos em cruzamentos de estradas e rios.

#### **3.2.2.2 Sensoriamento Remoto para análise da linha de costa na PCA**

A dinâmica costeira da PCA foi avaliada a partir da delimitação da LMA nas imagens dos satélites Landsat 2 e 5, sensores MSS e TM (Tabela 1), em de médio período (33 anos –

1977 à 2010), numa escala de 1:100.000, através de interpretação visual das composições coloridas das bandas 3, 4 e 5, e combinações 5R4G3B para todas as imagens utilizadas.

Os dados morfológicos e suas mudanças foram organizados e os planos de informações integrados em BDG's nos SIG's (PCI 8.0 da Geomática e ArcGis 9.0 da ESRI): imagem (raster), temáticos, rede, e cadastrais, possibilitando o mapeamento da evolução da linha de costa da PCA, bem como o cálculo das áreas de progradação e de retrogradação.

Os dados dos sensores remotos passaram por processamento digital de imagens (PDI), seguindo métodos já realizados (Dolan *et al.* 1980, Crowell *et al.* 1991, Souza Filho 2000, Thieller 2005, Chu *et al.* 2006, e Callaghan *et al.* 2009), para a identificação da linha de maré alta (LMA), fixação da posição da linha de costa de 1977 e delimitação das mudanças da LMA nas outras imagens, até o ano de 2010.

#### 3.2.2.2.1 Imagens Landsat e cálculo de erro da análise multitemporal

A dinâmica da PCA foi avaliada por interpretação visual das imagens multitemporais do satélite Landsat, sensores MSS e TM, cenas disponíveis entre os anos de 1977 à 2010, e delimitação da LMA de cada ano.

As imagens Landsat utilizadas na análise da variação das posições da LMA constaram de aquisição de cenas condizentes com os horários de linha de maré alta (LMA) (DHN 2010), nas datas de passagem das imagens, em médio período (Tabela 1).

As imagens Landsat passaram por pré-processamento: georreferenciamento ou registro de imagens (transformação geométrica) com a inserção da projeção para o Hemisfério Sul no aplicativo Global Mapper. O pré-processamento digital de imagens incluiu: a correção atmosférica; a leitura dos histogramas; e reamostragem das imagens para 8 bits. Os dados de entrada das imagens foram: Datum WGS 84; Projeção Coordenadas Geográficas; Zona -24 (42°W – 36°W); e foram reprojatadas para Datum SAD 69, Projeção UTM, zona -24.

TABELA 1 - Características dos produtos de sensores remoto multitemporais.

Satélite	Sensor	Órbita/Ponto	Bandas	Data de Aquisição	Resolução Espacial	Formato
Landsat2	MSS	234/62	4,5,6,7	24/05/1977	60 x 60	8 bits
Landsat2	MSS	234/62	4,5,6,7	14/07/1982	60 x 60	8 bits
Landsat5	TM	218/62	1,2,3,4,5,6,7	05/09/1988	30 x 30	8 bits
Landsat5	TM	218/62	1,2,3,4,5,6,7	18/11/2003	30 x 30	8 bits
Landsat5	TM	218/62	1,2,3,4,5,6,7	27/04/2010	30 x 30	8 bits

Neste estudo, a correção geométrica foi realizada nas imagens Landsat como parte do pré-processamento, no intuito de diminuir ruídos e interferências atmosféricas para melhorar a qualidade das imagens através de métodos já aplicados (Barale & Folving 1996, Boulhosa & Souza Filho 2005).

O processamento digital de imagem (PDI) incluiu a ortorretificação das imagens Landsat a partir das imagens do satélite Quickbird (2004), com a altitude inserida dos pontos coletados em campo com o DGPS, realizadas no aplicativo EASI-PACE (PCI 8.0). Posteriormente, foi feito um realce linear e contraste para as bandas.

Com base nos erros dos pontos de controle e por meio de regra de três simples, estabeleceu-se a margem de erro geométrico para cada imagem e o erro geométrico máximo (cumulativo). O erro da correção geométrica das imagens foi menor que 0,5m, com os pontos coletados com DGPS. O erro residual final dos 30 pontos de controles foi de, 0,72, 0,75, 0,61, 0,65 e 0,55 pixel, para o registro das imagens Landsat de cada ano (1977, 1983, 1988 e 2003 e 2010), respectivamente, obtidos das imagens ortorretificadas Quickbird, bons para o mapeamento em média escala.

Assim, para a posição da linha de costa ocorreu um erro geométrico individual: linear de 23,92m (1977), 26,73m (1983), 16,54m (1988), 16,61m (2003) e 15,72m (2010). O erro geométrico cumulativo linear foi de 50,65m (1977/1983), 43,27m (1983/1988), 33,15m (1988/2003) e 32,33m (2003/2010), portanto, correspondeu a um erro em área de 1847,10m<sup>2</sup>, 1404,21m<sup>2</sup>, 670,34m<sup>2</sup>, 679,39m<sup>2</sup>, para cada período, respectivamente, como sendo limites mínimos do método, cujas variações não são detectadas (França & Souza Filho, 2005).

A análise do erro em trabalhos de variação da linha de costa é essencial devendo-se realizar experimentos para obter uma boa acurácia (Crowell *et al.* 1991). Para a análise multitemporal da linha de costa da PCA, nos dados de 1977/1983, as mudanças de até 1847.10m<sup>2</sup> de áreas costeiras ou de até 50.65m de distâncias lineares, são desconsideradas ou tratadas como fora do limite de detecção dos sensores, interpretando-se como trechos estáveis ou sem mudanças aparentes.

As imagens foram salvas em \*.pix no PCI 8.0, importadas para serem utilizadas no conjunto da ESRI (ArcGis 9.0), para ser realizada a interpretação visual. Neste aplicativo, foram delimitadas as linhas de marés altas e calculadas as áreas para a realização dos mapas de progradação e retrogradação da linha de costa da PCA.

### 3.2.3 Variação da linha de maré alta (LMA) na PCA em médio período (1977-2010)

A posição da linha de maré alta PCA apresentou significativas mudanças (Figura 2), onde observa-se maior retrogradação da LMA nas primeiras décadas, entre 1977/1982 e 1982/1988. Entre 1988/2003 nota-se progradação da LMA, e entre 2003/2010 novamente a ocorrência de retrogradação da LMA. A taxa de erosão máxima foi de 12,24 m/ano do recuo da linha de costa anual da PCA, e a taxa de acresção máxima de 8m/ano.

A LMA retrogradou de -979739,74 m<sup>2</sup> ou -0,98 km<sup>2</sup> (72,46%) no período de 1977-2010 (33 anos), com um recuo linear de 668 m. A progradação da LMA concentrou-se no terceiro período (1988/2003) com valor máximo em área de 372328,60 m<sup>2</sup> ou 0,37 km<sup>2</sup>, com avanço linear de 394 m.

A LMA da praia de Torrões (setor 1) apresentou um recuo de 404 m, e um avanço de 185 m, predominando recuo da LMA. No setor 2 (praia de Almofala/Barreira) a LMA avançou 209 m e 264 m. A LMA no setor 1 perdeu -84398,94 m<sup>2</sup>/6anos (1977/1983), com recuo linear da linha de costa de 82 m (Tabela2, Figura 3a), e engordou 36170,97 m<sup>2</sup>/6anos, com avanço linear de 33 m (Figura 3a).

Tabela 2. Progradação e Retrogradação da linha de costa da PCA (1977-2010)

Processo	Progradação (Engorda)			Retrogradação (Perda)		
	área (m <sup>2</sup> )	linear (m)	%	área (m <sup>2</sup> )	linear (m)	%
setor 1						
1977/1983	36170,98	33	30	84398,94	82	70
1983/1988	11738,10	29	9	118685,19	155	91
1988/2003	93840,72	90	51	90160,69	88	49
2003/2010	1659,77	33	2	81328,68	79	98
setor 2						
1977/1983	53689,21	25	22	190352,64	123	78
1983/1988	63787,88	27	37	108611,80	61	63
1988/2003	162342,98	123	65	87415,45	41	35
2003/2010	9494,18	34	5	150324,50	39	95

A LMA da praia de Torrões (setor 1) perdeu -118685,19 m<sup>2</sup>/5anos (1983/1988) com recuo linear médio de 155 m, e engordou 11738,10 m<sup>2</sup>/5anos com avanço linear de 29 m (Tabela 2, Figura 3b). No setor 1 a LMA engordou 93840,70 m<sup>2</sup>/15anos (1988/2003) com avanço linear de 90 m (Figura 3c), e perdeu -90160,70 m<sup>2</sup> com recuo linear nesse período de 88 m (Figura 3c). Este setor da PCA retrogradou -81328,70 m<sup>2</sup>/7anos (2003/2010) com recuo linear de 79m e progrediu de 1659,70 m<sup>2</sup> com avanço linear de 33 m (Tabela 2, Figura 3d).

No setor 2 (praia de Almofala/praia da Barreira) a LMA retrogradou  $-190352,6 \text{ m}^2/6\text{anos}$  (1977/1983) com recuo linear médio de 123m (Tabela 2, Figura 4a), e progradou  $53689,2 \text{ m}^2$  com um avanço linear de 25 m (Figura 4a).

Nesse setor a retrogradação da LMA foi de  $-108611,8 \text{ m}^2/5\text{anos}$  (1983/1988) com recuo máximo de 61 m, e a progradação de  $63787,8 \text{ m}^2$  com avanço linear de 27 m, (Figura 4b). A LMA engordou  $162342,97 \text{ m}^2/15\text{anos}$  (1988/2003), avançando 123 m (Figura 4c), e perdeu  $-87415,4 \text{ m}^2/15\text{anos}$  (1988/2003), recuando 41 m (Figura 4c).

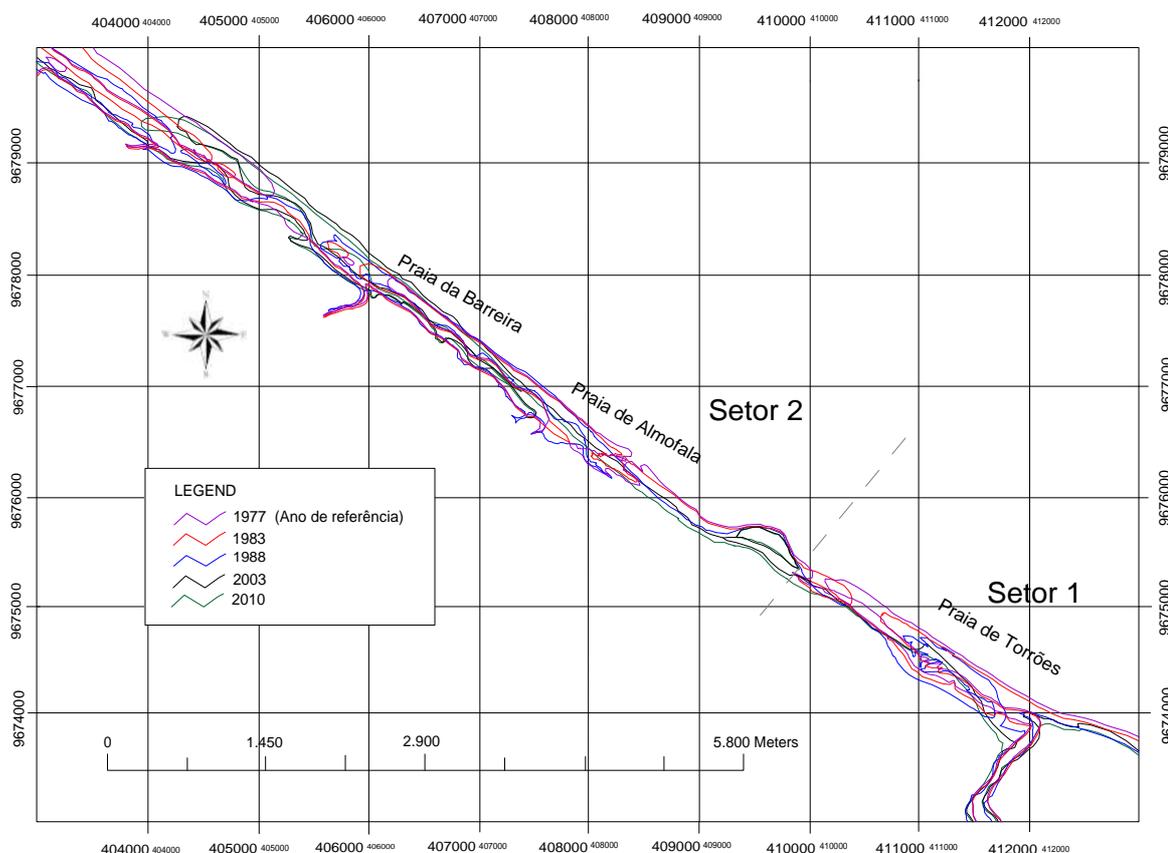


Figura 2. Variação da linha de Maré Alta (LMA) da PCA para o período de 1977-2010.

O setor 2 caracterizou-se por retrogradação de  $150324,5 \text{ m}^2/7\text{anos}$  (2003/2010) e recuo linear da linha de costa de 39 m, com progradação de  $9494,2 \text{ m}^2$  e avanço linear de 34 m (Figura 4d). As praias de Almofala e da Barreira foram caracterizadas por retrogradação, exceto de 1988/2003 (65%), quando progradou causando um aumento no comprimento do cordão litorâneo na praia da Barreira (Figuras 1a,b, e 3c).

Essas transformações estão relacionadas a processos naturais controlados por efeito das marés, ondas e ventos responsáveis por crescimento ou diminuição de manguezais,

desenvolvimento de cordões e bancos arenosos, migração de desembocaduras de canais de maré, variabilidade do perfil praial, etc.

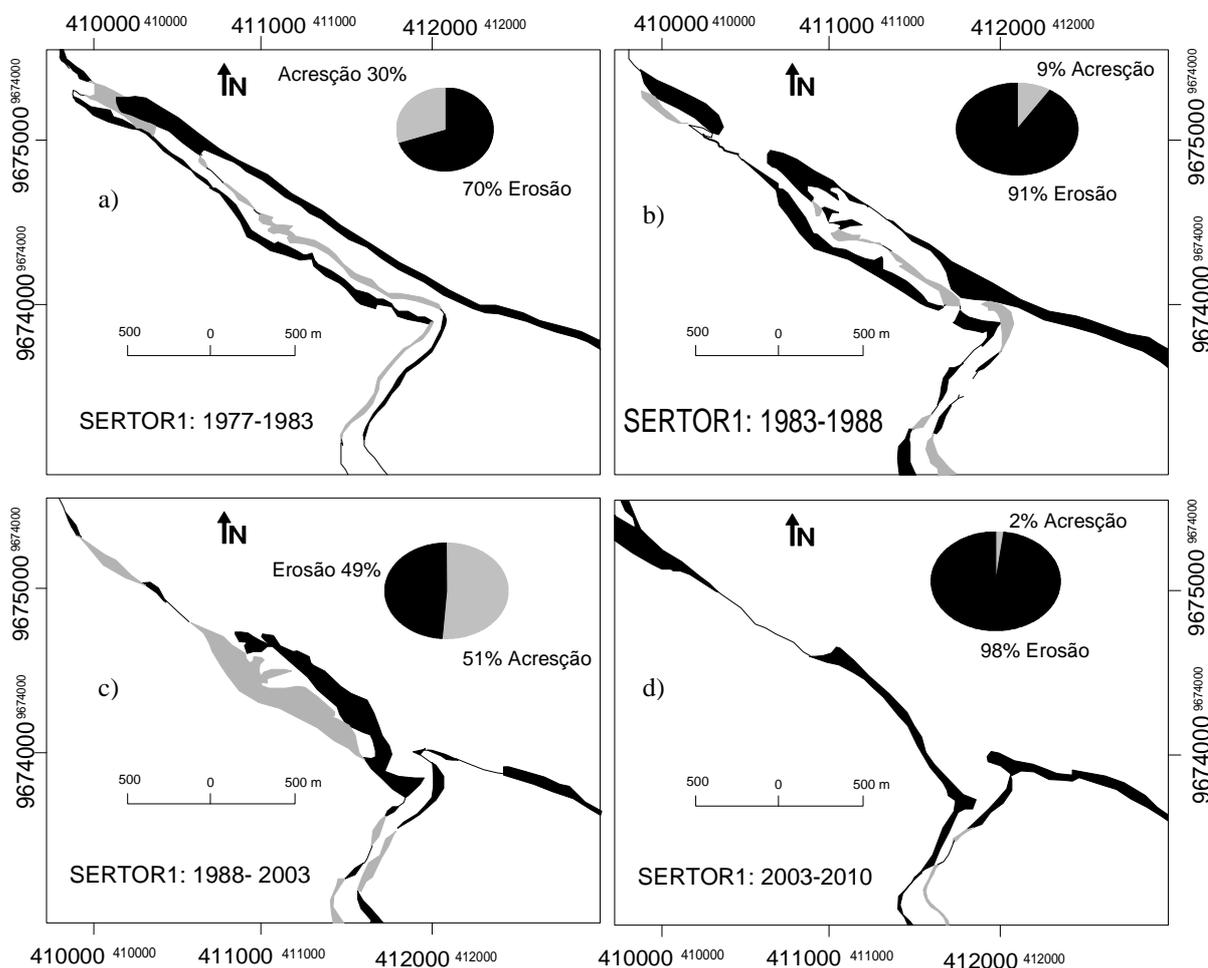


Figura 3. Mapas de progradação e retrogradação no setor 1: 1977-1982 (a); 1983-1988 (b); 1988-2003 (c); 2003-2010 (d).

A utilização das imagens Landsat (ETM+) na variação morfológica costeira em curto período é de grande limitação em alta escala de detalhe, pois limita a extração das áreas (Samat *et al* 2005). A fusão de imagens Landsat com radares como o Radarsat, em análise de evolução costeira são úteis em estudos de curto período (Souza Filho 2000).

As imagens Landsat (MSS e TM) no estudo da variação LMA da PCA foram viáveis na avaliação da dimensão dos processos erosivos e acrescenciais da área, constituindo uma boa acurácia no estudo em médio período e média escala. O erro na análise dos dados apresentou um máximo entre 1977/1983, onde as mudanças de até 1847.10m<sup>2</sup> de áreas costeiras ou de até 50.65m de distâncias lineares, foram desconsideradas ou tratadas como fora do limite de detecção dos sensores, interpretando-se como trechos estáveis ou sem mudanças aparentes. Os dados da interpretação visual das imagens Landsat tiveram uma variância de 16.70%.

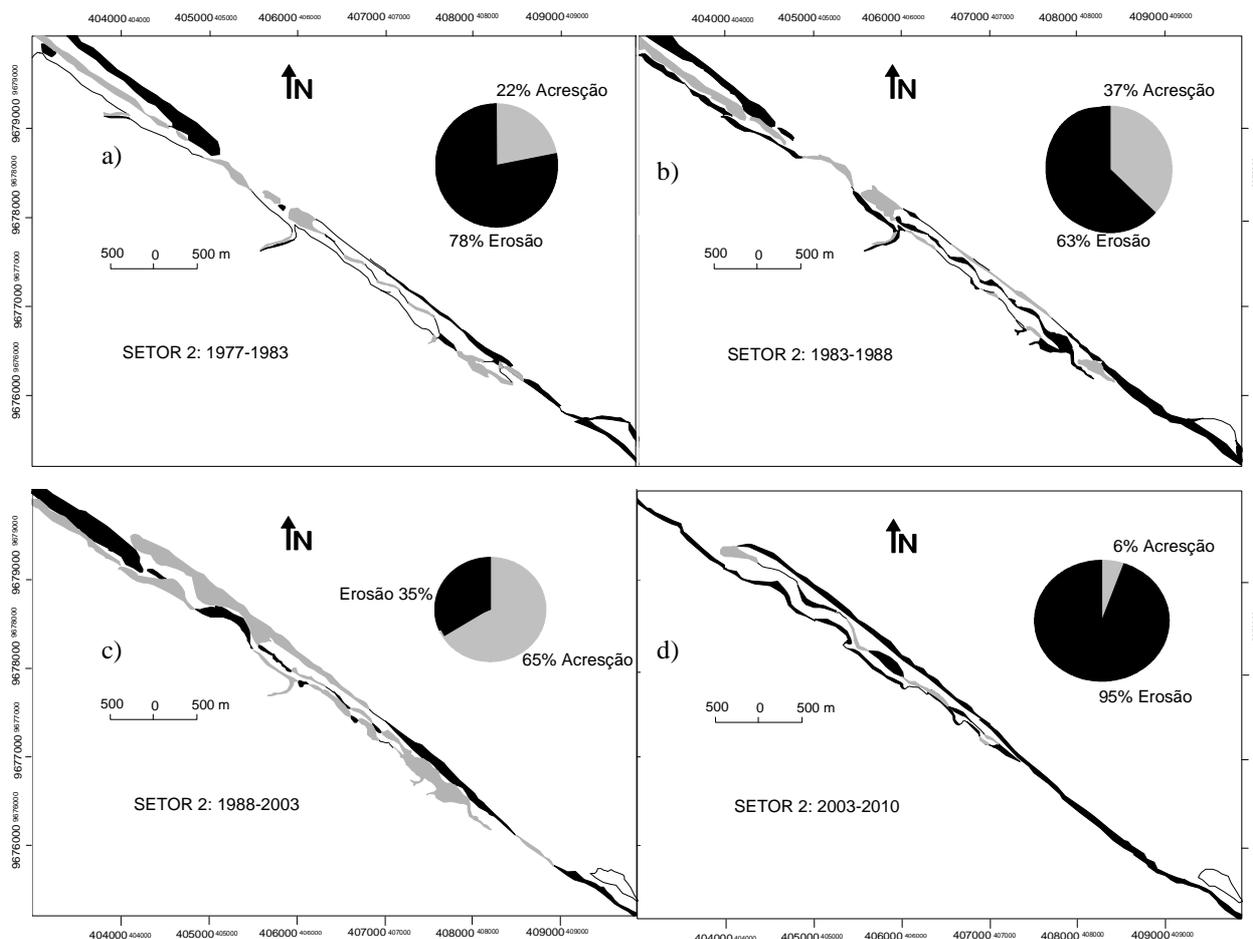


Figura 4. Mapas de progradação e retrogradação no setor 2: 1977-1982 (a); 1983-1988 (b); 1988-2003 (c); 2003-2010 (d).

### 3.2.4 Impactos das mudanças morfológicas da linha de costa na PCA

Foram observadas significativas mudanças na LMA na PCA, com retrogradação de  $-0,97 \text{ Km}^2/33\text{anos}$  (1977/2010) de uma área total de  $1,35 \text{ Km}^2$ , com recuo linear máximo de 404m, a uma taxa erosão da LMA de 12,24 m/ano, progredando  $0,37 \text{ Km}^2/33\text{anos}$ .

A praia do Farol (Itarema) está entre as áreas mais críticas do estado do Ceará (Farias & Maia 2010) com máximos de 8,8 m/ano de recuo da linha de costa, constando que esta, com as praias de Almofala, da Barreira e de Torrões, juntas formam um “hot spot” (zona de erosão avançada) segundo classificação de Klein *et al.* (2009), com alta vulnerabilidade aos riscos ambientais (Kumar *et al.* 2010).

Os “hot spots” (Klein *et al.* 2009, Siegle & Calliari 2008 e Pianca *et al.* 2010) nas praias da região Sul do Brasil estão associados a eventos extremos como as tempestades e os ciclones que acentuam os processos de erosão.

Na PCA as anomalias climáticas podem influenciar na erosão e acreção de sedimentos na linha de costa. Registros de fortes eventos El Niño foram observados (1982/83, 1997/98 e 2009/2010), e de intensidade moderada a forte (1977/1978, 1986/1987, 1992/1993, 1993/1994, 2002/2003, 2004/2005, 2006/2007). Eventos La Niña apresentam registros nos anos de 1973/1974, 1974/1975, 1984/1985, 1988/1989 e 1995/1996, 1998/1999, 1999/2000, 2001/2002, 2008/2009 (FUNCEME 2010, CPTEC 2010).

As anomalias climáticas como El Niño interferem na circulação atmosférica e oceânica de grande escala e provocam mudanças nas condições climáticas de várias regiões, com aumento ou diminuição das temperaturas do ar, do mar e precipitações (Souza Filho 2000, França 2003, Siegle & Calliari 2008, Klein *et al.* 2009).

As praias de macro-marés de Bragança (Pará), apresentaram altos valores de recuo da linha de costa (Souza Filho *et al.* 2000, Souza Filho & Paradella 2003) variando de 1500 m e 1250 m, com taxa de erosão de 48 m/ano na praia de Buçucanga. A região apresentou valores excessivos de precipitação 4069 mm em 1985 (se comparado com a média 2500 mm), período de La niña, quando a linha de costa recuou significativamente.

Assim, nas praias da PCA as menores precipitações estão relacionadas aos fortes eventos de El niño (Figura 5), e as altas precipitações relacionadas a fortes eventos La niña, como em 1985 com retrogradação da LMA (1983 a 1988) (Figuras 3, 4 e 5), o que ocorreu também na praia de Bragança (Souza Filho 2000). Períodos de ausência de eventos ou moderados (El niño e La niña) são fases de calmaria dos processos de erosão e acreção.

Os maiores impactos erosivos foram entre 1977/1983 e mais expressivos no setor 2 (Figura 4a), relacionados a ocorrência de fortes eventos El niño (Figura 5), ou neutralidade, quando as chuvas estão abaixo da média (1195,36mm), ou na média, respectivamente, influenciando em uma baixa vazão dos rios e no aporte de sedimentos.

Assim, em épocas que ocorreram fortes ou prolongados eventos La Niña notou-se um aumento nos processos de acreção de 1983/1988, e uma predominância desses processos de 1988/2003, quando as precipitações do município apresentaram-se acima da média, possibilitando um maior aporte de sedimentos pelos rios.

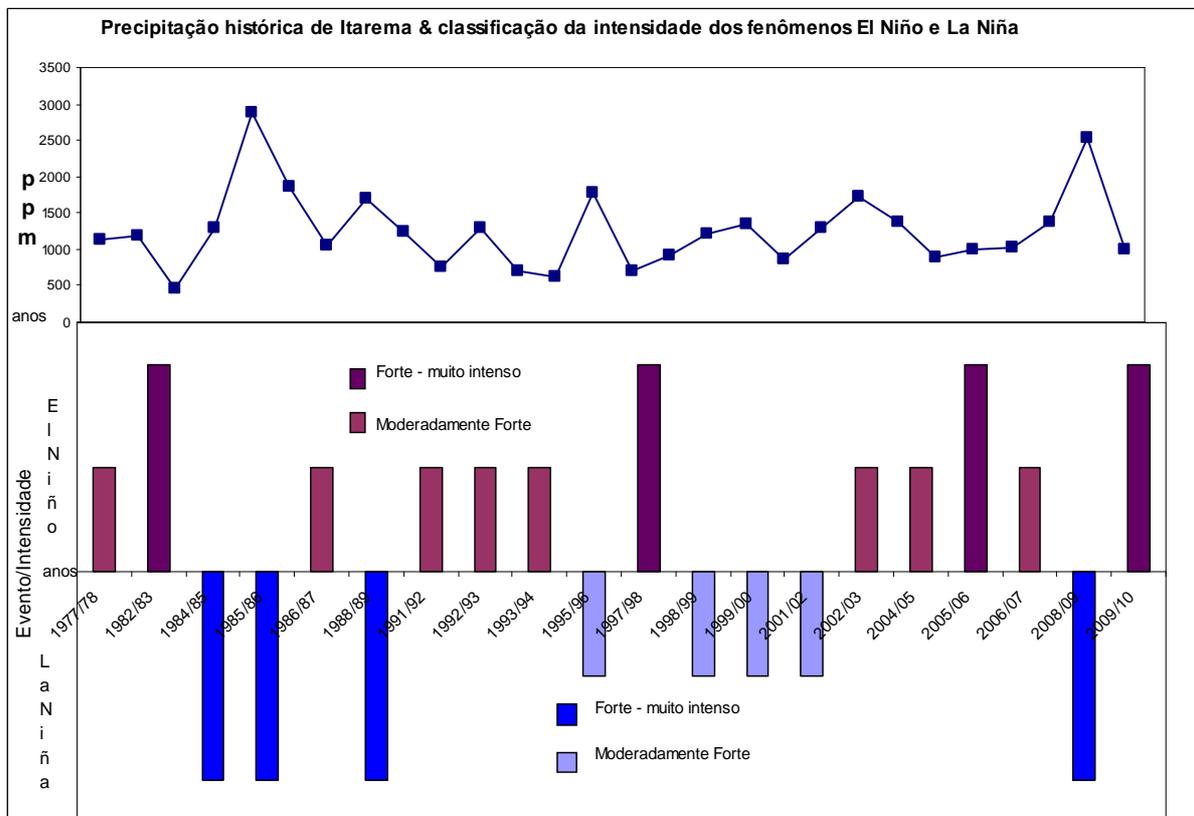


Figura 5. Precipitação histórica (1977/2010) do município de Itarema relacionada com a classificação da intensidade das anomalias do El niño e La niña.

Com relação aos setores esses processos não foram homogêneos na praia Torrões (setor 1) de 1983/1988 a LMA retrogradou (Figura 3b) na foz do rio Aracatimirim, que pode ter ocorrido devido a intensidade forte das chuvas, de La niña. Em compensação esse aporte de sedimento influenciado pela deriva litorânea pode ter sido depositado a oeste nas praias de Almofala e da Barreira (setor 2) pois ocorreu um aumento do cordão litorâneo (Figuras 1a,b,c, e 4b).

No período de 1988/2003 a acresção foi maior e mais homogênea, nos dois setores (Figuras 3c e 4c), quando ocorreram moderados eventos de La niña com leve aumento da precipitação (Figura 5), possibilitando uma mobilização de sedimentos mais homogênea nas três praias.

No período de 2003/2010 foi observado uma quase totalidade de processos erosivos nos dois setores (Figuras 3d e 4d) com prolongados eventos de El niño na PCA. Nesse período, ocorreram dois fortes e moderados eventos El Niño com TSM medindo 2 °C (2006) e 3°C (2010), com apenas um forte evento La Niña (2009), com TSM medindo -3°C (Figura 6).

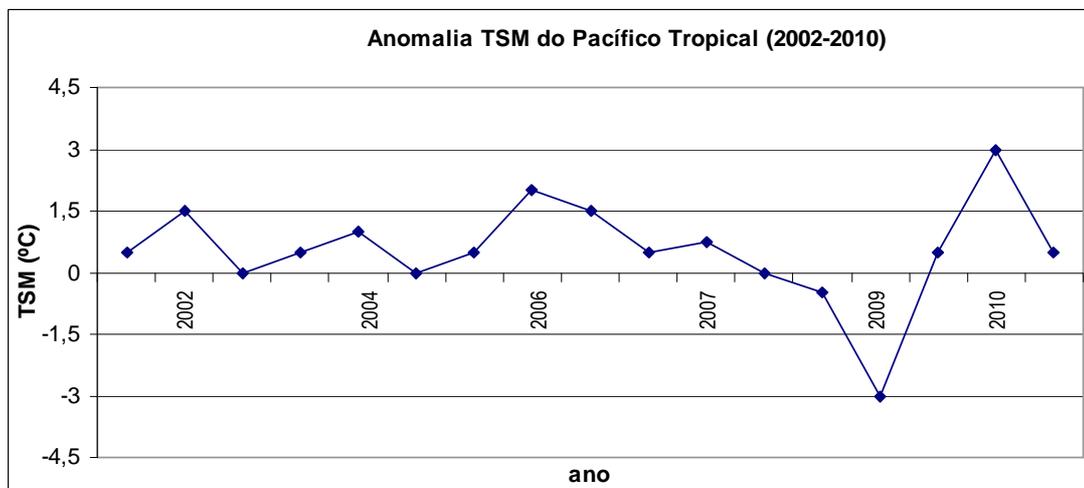


Figura 6. Anomalia TSM no Pacífico Tropical de 2002 à 2010 (Fonte: FUNCEME 2010).

Neste sentido, é evidente na PCA o crescimento ou diminuição de manguezais, desenvolvimento de cordões e bancos arenosos, migração de desembocaduras de canais de maré, paleomangues, resultantes da erosão e progradação da LMA (1977/1988).

### 3.2.5 Discussões

Nas praias com regime de macro-maré da região norte do Brasil vêm ocorrendo intensos processos erosivos com significativo recuo da linha de costa (Souza Filho 2000, França 2003, França & Souza Filho 2003, Souza Filho & Paradella 2005). As praias do complexo de Ilhas Barreira da Virgínia vêm sofrendo processos de erosão de 1962 a 2005 (Young *et al.* 2007). Na linha da costa das praias da PCA é verificado um elevado recuo da linha de costa com taxas de erosão máxima de 12,24 m/ano, e acresção máxima de 8 m/ano.

No entanto, a LMA no setor 2 (praia de Almofala/Barreira) apresentou taxas médias de erosão de 8,53 m/ano e acresção média de 3,16 m/ano, mais elevadas que o setor 1 (praia de Torrões), com taxas médias de erosão de 7,35 m/ano e acresção de 2,8 m/ano.

Praias semi-expostas próximas ao Rio Piçarras da enseada de Itapecorói SC (Araújo *et al.* 2010) apresentaram zonas de erosão acentuada e desequilíbrio no balanço sedimentar, apresentando nas áreas mais críticas taxas de retração (recuo) de -14 m<sup>3</sup>/m/ano, com taxa média entre 1998-2008 de -7,2 m<sup>3</sup>/m/ano.

Foram observadas significativas mudanças na posição da linha de maré alta (LMA) da PCA, com retrogradação nos períodos 1977/1982, e 1982/1988, e 2003/2010, e progradação da LMA de 1988/2003.

No setor 2 a LMA perdeu -190352,6 m<sup>2</sup>/6anos (1977/1983), e no mesmo período no setor 1 perdeu -84398,94 m<sup>2</sup>/6anos, somando -274751,58 (27,8%), do valor total da retrogradação 986205,43 m<sup>2</sup>/33anos (1977/2010).

As praias da PCA, segundo classificação de Klein *et al.* (2009), formam um “hot spot” (zona de erosão avançada) do estado do Ceará. Estudos anteriores já haviam confirmado que praias do município de Itarema, como a praia do Farol, vêm sofrendo intenso recuo da linha de costa, estando entre as áreas mais críticas do Ceará (Farias & Maia, 2010).

Os períodos com ocorrência de La niña, aumentam as precipitações, as vazões dos rios, e os processos erosivos, causando recuo da linha de costa nas praias do norte do Brasil (Souza Filho, 2000, Souza Filho & Paradella 2005), e nas praias da PCA.

Na escala de 1:100.000 da Imagens Landsat, foi possível analisar a evolução da LMA da área, respeitando-se os limites mínimos das áreas (retrogradacionais ou progradacionais) de cada ano, que foram: 50,65 m ou 1847,10 m<sup>2</sup>, 43,27 m ou 1404,21 m<sup>2</sup>, 33,15 m ou 670,34 m<sup>2</sup>, e 32,33 m ou 679,39 m<sup>2</sup>, para os períodos de 1977/1983, 1983/1988, 1988/2003, 2003/2010, respectivamente, de acordo com o cálculo de erros.

### 3.2.6 Conclusões

A LMA da PCA apresentou significativas mudanças com predominância de retrogradação nos primeiros períodos entre 1977/1982, 1982/1988 e 2003/2010, e de progradação no terceiro período de 1988/2003, decorrente da acresção ou engorda de sedimentos na área. A LMA apresentou taxas de erosão máxima de 12,24 m/ano e acresção máxima de 8 m/ano, contudo, esses valores foram maiores no setor 2.

A LMA teve uma maior retrogradação de 1977/1983 perdendo -274751,58 m<sup>2</sup> (27,8%) de área de um total de erosão de -986205,43 m<sup>2</sup> (1977/2010).

### 3.2.7 Referências bibliográficas

Barale V. & Folving S. 1996. Remote sensing of coastal interactions in the Mediterranean region. *Ocean & Coastal Management*, 30 (2-3): 217-233.

- Carvalho A. M. 2003. *Dinâmica costeira entre Cumbuco e Matões, costa noroeste do Estado do Ceará*. Ênfase nos processos eólicos. Tese de Doutorado, Curso de Pós-Graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 194p.
- Callaghan D., Ranasinghe R., Short A. 2009. Quantifying the storm erosion hazard for coastal planning. *Coastal Engineering*, 56: 90-93. DOI:10.1016/j.coastaleng. 2008.10.003
- Chen S., Chen, L., Liu Q., Li X., Tan Q. 2005. Remote sensing and GIS-based integrated analysis of coastal changes and their environmental impacts in Lingding Bay, Pearl River Estuary, South China. *Ocean & Coastal Management*, South China, 48: 65-83.
- Chu Z. X., Sun, X. G., Zhai S. K., Xu K. H. 2006. Changing pattern of accretion/erosion of the modern Yellow River (Huanghe) subaerial delta, China: Based on remote sensing images. *Marine Geology*, 227(1/2): 13-30. DOI:10.1016/j.margeo.2005.11.013
- SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - CPRM. 2003. *Atlas de geologia e Recursos minerais do Ceará: Sistemas de Informações Geográficas - SIG*. Mapas na escala 1:500.000. Brasil: CPRM, Fortaleza: CNPQ, ICD-Rom.
- CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS - CPTEC. 2010. *El niño e La niña*. [http://www.cptec.inpe.br/enos/Oque\\_el-nino.shtml](http://www.cptec.inpe.br/enos/Oque_el-nino.shtml). Acesso em: 08 de janeiro de 2008.
- Crowell M., Leatherman S. P., Buckley M. K. 1991. Historical shoreline change: error analysis and mapping accuracy. *Journal of Coastal Research*, 7: 839-852.
- DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO - DHN. 2010. *Marés*. Portal da Diretoria de Hidrografia e Navegação, Niterói, RJ, Brasil. Disponível em <https://www.mar.mil.br/dhn/chm/mares.html> (Acessado em: 5 de Dezembro de 2010).
- Dolan R. B., Hayden B.P., May P. 1980. The reliability of shoreline change measurements from aerial photographs. *Shore and Beach*, 48: 22-29.
- Farias E. G. G. & Maia L. P. 2010. Uso de Técnicas de Geoprocessamento para a Análise da Evolução da Linha de Costa em Ambientes Litorâneos do Estado do Ceará, Brasil. UNIVALE. *Journal of Integrated Coastal Zone Management*. 1:1-23.
- Fernandes, A. 2000. *Fitogeografia Brasileira*. Fortaleza: Multigraf. 340p.
- França C. F. de F. & Souza Filho P. W. M. 2003. *Análise das Mudanças Morfológicas Costeiras de Médio Período na Margem Leste da Ilha de Marajó (PA) em Imagem Landsat*. Revista Brasileira de Geociências. 33(2): 127-136.
- França C. F. 2003. *Morfologia e mudanças costeiras da margem leste da Ilha de Marajó (PA)*. Tese de Doutorado. Centro de Geociências. Universidade Federal do Pará. Belém: UFPA. 144p.
- FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS - FUNCEME. 2010. *Meteorologia e Oceanografia*. Fortaleza: FUNCEME. <http://www.funceme.br/DEMETS/index.htm>. Acesso em: 31 de dezembro de 2010.

- Jensen J. J., Halls J. N., Michel J. 1998. A systems approach to environmental sensitivity index (ESI) mapping for oil contingency planning and response. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 64 (10): 1003-1014.
- Jensen J. R., Narumalani S., Weatherbee O., Murday M., Sexton W. J.; Green, C.J. 1993. Coastal environmental sensitivity mapping for oil spills in the United Arab Emirates using remote sensing and GIS technology. *Geocarto International*, 2: 5-13.
- Klein R. J. T., Nicholls R. J., Ragoonaden S., Capobianco M., Astoni J., Buclde E. N. 2001. *Technological Options for Adaptation to Climate Change in coasta Zones. Journal of Coastal Research*. Florida: Summer. 3: 531-543.
- Li R., Deshpande S., Niu X., Lee I-C., Wu B. 2008. Multi-dimensional geospatial data integration for coastal change analysis. The International Archives of the Photogrammetry, *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Beijing. XXXVII (8): 1311-1316.
- Maia L.P. & Cavalcante. 2005. *Mapeamento das Unidades Geoambientais da Zona Costeira do Estado do Ceará*. Programa Zoneamento Ecológico-Econômico da Zona Costeira do Estado do Ceará. Fortaleza: SOMA/ SEMCE/ LABOMAR. 226p.
- Marfai M. A. & Almohammad H. 2008. Coastal dynamic and shoreline mapping: multi-sources spatial data analysis in Semarang Indonesia. *Environ Monit Assess*. 142: 297-308. DOI 10.1007/s10661-007-9929-2
- Pianca C., Mazzini P. L. F., Siegle E. 2010. Brazilian offshore wave climate based on NWW3 reanalysis. *Brazilian Journal of Oceanography* (Impresso), 58: 53-70.
- Pinheiro L. S., Gomes M. L., Falcão T. O., Morais J. O. 2006. A Influência dos Processos Estuarinos na Morfodinâmica e Vulnerabilidade a Erosão da Prainha de Aquiraz-(CE). Anais do VI Simpósio Nacional de Geomorfologia/Regional Conference on Geomorphology, Goiânia, p. 1 – 20.
- Pinheiro L. S. & Morais J. O. 2007. Shoreline Change of the Mucuripe Harbour Zones (Fortaleza-Ceará, Northeast of Brazil) 1972 – 2003. Australia: *Journal of Coastal Research*. Special Issue 50 (50): 1163-1167.
- Silva M. G. L. da. 2001. *Avaliação Multitemporal da Dinâmica Costeira da Praia do Pescador, Bragança (norte do Brasil)*. EL-ROBRINI, M. (Docente). Mestrado em Geologia. Universidade Federal do Pará. Belém: UFPA. 113p.
- Siegle E. & Calliari L. J. 2008. High-energy events and short-term changes in superficial beach sediments. *Brazilian Journal of Oceanography*, 56: 149-152.
- Sales V. C. C. 2002. *Évolution Géomorphologique de la Zone Côtière le L'état du Ceará, Nord-Est Du Brésil: du Long Terme au Court Terme*. Tese de Doutorado. Paris: Université Paris-Sourbonne. 513p.

- Samat O., Marobin D., Simon B. 2005. Morphologie Cotiere et Amenagements. *Géosciences L'Environnement* (CEREGE). 1 :102-110.
- Souza Filho P. W. M. & El-Robrini M. 2000. Coastal Zone Geomorphology of the Bragança Area, Northeast of Amazon Region, Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, 30: 518-522.
- Souza Filho P. W. M. 2000. *Avaliação e Aplicação de Sensores Remotos no Estudo de Ambientes Costeiros Tropicais Úmidos, Bragança, Norte do Brasil*. Tese de Doutorado. Centro de Geociências. Universidade Federal do Pará. Belém: UFPA. 236p.
- Souza Filho P. W. M. & Paradella W. R. 2005. Use of RADARSAT-1 Fine Mode and Landsat-5 TM selective principal component analysis for geomorphological mapping in a macrotidal mangrove coast in the Amazon Region. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 31: 214-224.
- Short A. D. & Trembanis A. C. 2004. Decadal scale patterns in beach oscillation and rotation Narrabeen Beach, Australia-time series, PCA and wavelet analysis. *Journal of Coastal Research*, 20 (2): 523–532. Disponível em <http://www.jstor.org/stable/4299308>.
- Thieller E. R., Martin D., Ergul A. 2005. The Digital Shoreline Analysis System, version 2.3. *Shoreline change measurement software extension ArcMap 9.0. USGS Open-File*. Disponível em <http://woodshole.er.usgs.gov/project-pages/dsas/>
- Trebossen H., Deffontaines B., Classeau N., Kouame J., Rudant J. P. 2005. Monitoring coastal evolution and associated littoral hazards of French Guiana shoreline with radar images. *Comptes Rendus Geosciences*, 337(13): 1140–1153. DOI: 10.1016/j.crte.2005.05.013
- Young D. R., Porter J. H., Bachmann C. M., Shao G., Fusina R. A., Bowles J. H.; Korwan D.; Donato T. F. 2007. Cross-Scale Patterns in Shrub Thicket Dynamics in the Virginia Barrier Complex. *Ecosystems*, 10: 854–863. DOI: 10.1007/s10021-007-9084-1
- Yoshikawa S. & Nemoto K. 2010. Seasonal variations of sediment transport to a canyon and coastal erosion along the Shimizu coast, Suruga Bay, Japan. *Marine Geology*, 271: 165-176. DOI:10.1016/j.margeo.2010.02.010.

#### 4 MORFODINÂMICA DE PRAIAS OCEÂNICAS DOMINADAS POR MESOMARÉS NA PLANÍCIE COSTEIRA DE ALMOFALA, NW DO CEARÁ (BRASIL)

##### **Morphodynamic to oceanic beaches dominated by mesotidal in Almofala Coastal Plain, NW of Ceara (Brazil)**

##### **Resumo**

A morfodinâmica nas praias oceânicas da planície costeira de Almofala varia em função da ação de ondas, marés, e correntes agindo nos substratos costeiros. As praias de Almofala, da Barreira e de Torrões localizam-se na costa oeste do Ceará. A metodologia consistiu na aquisição de dados topográficos (DGPS), e oceanográficos (ondas - período, direção e altura da onda, e maré) e de sedimentos de praias. Estas praias apresentaram RTR com onda dominante. O parâmetro  $\square$  mostrou sistema barra e calha longitudinal nas praias de Almofala e de Torrões, e estágio reflectivo na Barreira. O parâmetro  $\Omega$  apresentou estágios predominantes de terraço de maré baixa na praia de Almofala, e dissipativo nas praias da Barreira e de Torrões, com predomínio de areia fina (44%) nas praias de Almofala e Torrões, e areia média (29%) na praia da Barreira. Estas praias são semi-expostas, com atuação de ventos (5,5 m/s) e ondas (0,56 m), com erosão nas praias da Barreira (-64,5 m<sup>3</sup>) e de Torrões (-72,1 m<sup>3</sup>), e acreção (62,83 m<sup>3</sup>) em Almofala (2007).

**Palavras-chaves:** morfodinâmica; praias oceânicas; meso-maré

##### **Abstract**

The morphodynamics by oceanic beaches of Almofala coastal plain change for action waves, tidal range and currents acting in the coastal geology. The Almofala, Barreira and Torroes beaches placed to west coastal of Ceara. The methodology consisted in collection of topographyc datas (DGPS), oceanographycs parameters (wave – period, direction and high wave, tidal range) and sediments analysis. This beaches showed RTR dominate wave. The parameter  $\square$  showed longshore bar and runnel to Almofala and Torroes beaches, and reflective to Barreira beach. The parameter  $\Omega$  showed stages low-tide terrace intermediate to Almofala beach and dissipative to Barreira and Torroes beaches, with dominate fine grain sizes (44%) to Almofala and Torroes, and median grain sizes (29%) to Barreira beach. This beaches is semi-exposed, with winds (5,5 m/s) and waves (0,56 m) action, with erosion to Barreira (-64,5 m<sup>3</sup>) and Torroes (-72,1 m<sup>3</sup>) beaches, and acretion (62,83 m<sup>3</sup>) to Almofala beach (2007).

**Key-words:** morphodynamic; oceanic beaches; meso-tidal

## 4.1 INTRODUÇÃO

As praias oceânicas constituem depósitos de acumulação pelas ondas de sedimentos de composição variada, não coesivos e inconsolidados (areias, cascalhos, single, cobbles), entre as zonas de base da onda ou *wave base* (profundidade máxima das ondas no transporte de sedimentos), e a zona de espraiamento (*upper swash limite*), limite de ação sub-área da onda até a linha de baixa maré (King 1959, Short 1999). O limite interno é o nível máximo de ação das ondas de tempestades.

O estudo morfodinâmico das praias é muito útil para a predição dos processos atuantes e o controle geológico (Jackson *et al.* 2005). A planície costeira de Almofala (PCA) segundo Muehe (2001) é caracterizada por um balanço de sedimentos negativo, sendo observado um recuo natural da linha de costa, e tende a apresentar maior amplitude de resposta erosiva a uma elevação do nível do mar, devido ao baixo gradiente de sua plataforma continental.

A PCA inclui as praias de Almofala, da Barreira e de Torrões, com morfologia de baixo gradiente topográfico (de 0,024 a 0,249), semi-expostas, com evolução de praias-barreiras, comuns em praias de alta energia ventos e ondas. Possuem cordões arenosos ou “*Strandplains*” e barras de cristas de baixa amplitude ou “*Low-amplitude ridges*” (Masselink *et al.* 2009, Austin *et al.* 2010).

Os processos naturais controlados por marés, ondas e ventos (erosão e deposição de sedimentos na costa) e processos antrópicos (ocupação humana, e fazenda de camarões) transformam a morfologia costeira, em várias escalas temporais (Raicich 2007, Sedrati 2007, Callaghan *et al.* 2009, Yoshikawa & Nemoto 2010), e agem no crescimento ou diminuição de manguezais, desenvolvimento de cordões e bancos arenosos, migração de desembocaduras de rios e canais de maré, variabilidade de perfis praias, etc.

Nas praias de Almofala e de Torrões a zona de supramaré inicia em muitos pontos no contato com escarpas de praias dos eolianitos, com quebra de relevo abrupto, se estendendo até 2 km na parte interna, ou com dunas frontais. A praia da Barreira possui extenso cordão litorâneo de 3 km, sua margem norte é no oceano Atlântico, com margem sul no canal de maré. Barras arenosas são geradas durante a transgressão marinha (Li *et al.* 2008) e marcadas por fácies *landward*, depositadas em estuários, como nas praias da Barreira e de Torrões.

As praias com baixo ângulo de declive da zona submersa e grande estoque de areia subaquática, formam-se praias dissipativas ou intermediário-dissipativas, com sistemas de barras e calhas bem desenvolvidos que geram ondas do tipo deslizante, cujas arrebentações ocorrem a certa distância da face praial. A energia das ondas é dissipada ao longo de uma

zona de surfe larga e plana, movimentando com sedimentos mais finos na direção da praia (Wright & Short 1984, CERC 1984).

De acordo com Reineck & Singh (1980) a praia subdivide-se em: zona de supra-maré (*backshore*) - do limite inferior das dunas até a linha de maré alta (LMA); zona de inter-maré (*foreshore*) - estende-se da linha de maré alta até a linha de maré baixa (LMB), as correntes longitudinais originam uma ou mais barras e calhas, expostas durante a maré baixa; e zona de infra-maré (*shoreface*) - da linha de maré baixa (LMB) até a zona de arrebentação, incluindo a zona de surfe, submersa, constituída por sistema barra e calha longitudinal, associado à arrebentação das ondas e às correntes longitudinais.

Estas zonas se diferenciam pelas características morfológicas e granulométricas, tempo de exposição sub-aérea, ou de inundação, e dinâmica. Na zona de *shoreface* da PCA, os sistemas de barras e calhas são bem desenvolvidos em julho de 2007 (Figura 2, 3 e 4).

As praias de Almofala, da Barreira e de Torrões dispõem-se por 8 km (Figura 1), e estão localizadas na costa oeste do estado do Ceará (Nordeste, Brasil) (coordenadas UTM: X1: 403000 E, 9673000N, X2: 412000E, 9679000N). Limitam-se ao sul (distrito de Carvoeiro), ao norte (Oceano Atlântico), a oeste (praia da Barra), e a sudeste (praia de Camboré). A área possui altas temperaturas (>25°C), pluviometria média de 1.172,21 mm (FUNCEME 2008), ventos de 5,5 m/s, regime de meso-marés (1,48 m), e ondas de 0,56 m.

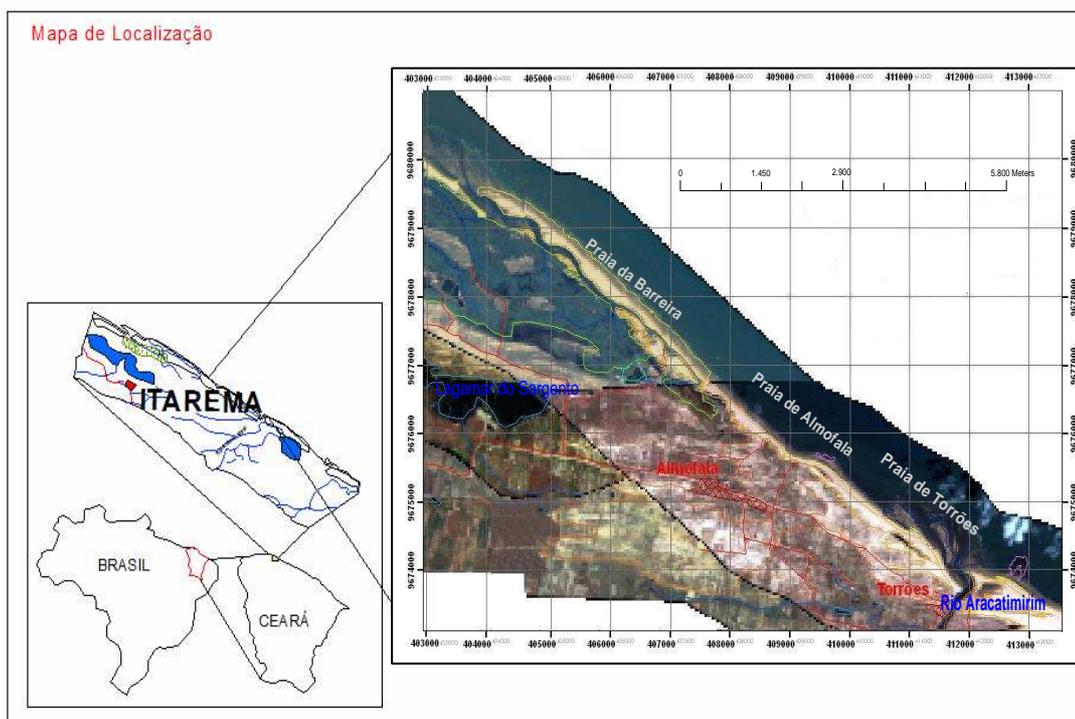


Figura 01. Mapa de localização da Planície Costeira de Almofala, com destaque as praias oceânicas de Barreira, Almofala e Torrões.

## 4.2 METODOLOGIA

A metodologia constou de pesquisa bibliográfica e documental, além de levantamentos de campo e análise laboratorial.

Os dados oceanográficos de marés e correntes no município de Itarema foram disponibilizados pelo BNDO, do Quadrado 29 (referente ao Quadrado de Marsden 303) do ano de 2000 (DHN 2006).

### 4.2.1 Levantamento de perfis praias e coleta de amostras

Os perfis topográficos nas praias estudadas foram realizados mediante o uso de dados através do par de DGPS (*Differential Global Positioning System*) de marca Prymark2 Ashtech. Foram feitos 14 perfis transversais iniciando nas dunas, ou no pós-praia, indo até a linha de maré baixa LMB, mediante o método “*in situ*” de perfilagem *stop*” and “*go*”. Os dados foram de altíssima precisão < 1 m (Baptista *et al.* 2006), que deram acurácia < 0.5 m, com as posições do DGPS, variando de zero a 5 cm.

Os dados de maré (amplitude) foram adquiridos no site da DHN (Diretoria de Hidrografia e Navegação) durante o ano de 2007. Foram coletados pontos a cada 100 m para a medição da linha de maré baixa, e a cada 100 m para a linha de maré alta.

Os perfis praias foram realizados, trimestralmente, para análise das variações sazonais (quardras chuvosas - 19/03/2007, intermediárias - 14/07/2007, e secas - 24/11/2007). Para o par de DGPS's, foram usadas as referências de três pontos: o primeiro, onde ficou um DGPS fixo, foi o do Marco da Estação 92397 de Itarema (IBGE, 2007), Datum SAD 69, coordenadas UTM (N) 9.677.308,499 e (E) 397.876,875; o segundo ponto foi o marco na praia de Almofala com coordenadas UTM (N) 9.675.912,457 e (E) 408.556,088; e o terceiro ponto de referência condiz com cada ponto coletado em cada um dos perfis.

Para a caracterização das praias da PCA os dados de altimetria foram medidos em condições de maré baixa de sizígia, com uso de DGPS de 14 pontos, 5 perfis em cada praia: de Almofala (distância 400 m) e da Praia da Barreira (distância 800 m) (Perfil A e B - 1, 2, 3, 4 e 5), e 4 perfis na Praia de Torrões (distância 400 m) (Perfil T - 1, 2, 3, 4), com indicação de siglas: chuvoso - c; seco - s; e intermediário - i, e as e de letras (A, B, C,..., Z).

Os pontos cotados tiveram uma variância de 2,36% e desvio padrão de  $\pm 1,25$ .

#### 4.2.2 Coleta de sedimentos praiais

Coletas sistemáticas de amostras de sedimentos foram realizadas nas praias da PCA para análises granulométricas. Os pontos de coleta de sedimentos coincidiram com os perfis topográficos, e entre cada perfil, adotando a distância de 200 m entre estes, nas praias de Almofala e de Torrões, e 400 m na praia da Barreira.

A distância de coleta de sedimentos cada perfil, foi de 20 m, a partir da linha de maré alta de sizígia, simultaneamente à realização dos levantamentos topográficos sazonais, mediante o uso de uma tampa de tubo PVC de 5 cm, para coleta dos primeiros 3 cm, referentes à deposição semi-diurna. Foram determinadas as classes granulométricas e os parâmetros estatísticos propostos por Folk & Ward (1957).

#### 4.2.3 Medição dos parâmetros oceanográficos

Os dados sobre período e altura das ondas foram obtidos segundo a metodologia descrita por Muehe (1998). Para caracterizar o regime de ondas na PCA, o método envolveu a medição da altura da onda na zona de arrebentação ( $H_b 1/3$ ), obtida através da diferença de altura, entre a crista e a calha subsequente, utilizando a régua graduada. O período das ondas ( $T$ ) foi medido a partir da passagem de 11 cristas consecutivas ( $1/10$  do tempo total).

O ângulo de incidência das ondas foi obtido através de medições com Bússola de “Brunton”, para a orientação de cada perfil topográfico, em campo, sempre em uma direção perpendicular à linha de costa. A caracterização da deriva litorânea foi baseada nos geoindicadores, a posição e migração de feições costeiras, além dos modelos de previsão de transporte “*crosshore*” (“*onshore//offshore*”) de Trenhaile (1997).

#### 4.2.4 Processamento dos perfis praiais

Para a caracterização das praias da PCA, os pontos de marcação dos perfis foram processados nos aplicativos da Golden Software (Grapher 2.0, e Surfer 8.0) para a geração dos modelos morfodinâmicos, e execução do cálculo de volume remobilizado de sedimento nos perfis praiais, segundo métodos adotados por Silva Filho (2004).

#### 4.2.5 Análise de sedimentos arenosos

As amostras de sedimentos praiais foram lavadas com água destilada no LRMM, secas em estufa a 50° C. Nas amostras com mais de 25% de silte e argila foram feitas o

peneiramento úmido. A amostra foi peneirada (a 0.063 mm), a areia foi a retida na peneira, o que passou foi silte e/ou argila. A areia foi levada à estufa para secar, enquanto as frações de silte/argila foram levadas à centrífuga para separação e em seguida à estufa para secagem.

As amostras arenosas, após secas, foram quarteadas e divididas em partes de 100g, peneiradas utilizando as peneiras com malhas de 2.000, 1.400, 1.000, 0.710, 0.500, 0.355, 0.250, 0.180, 0.125, 0.090 e 0.063 mm, e todas as frações de areia, silte e argila pesadas, e as classes granulométricas e os parâmetros estatísticos feitos como Folk & Ward (1957).

#### 4.2.6 Parâmetros morfodinâmicos

A caracterização do estado morfodinâmico das praias da PCA foi obtida segundo os modelos de Guza & Inmam (1975), Wright & Short (1984), Masselink (1993) e Masselink & Short (1993), existentes para morfodinâmica de praias arenosas oceânicas.

Primeiramente, a morfodinâmica foi avaliada pelo Parâmetro Relativo da Maré (*relative tide range*) ou RTR <sup>(1)</sup> de Masselink (1993), devido a variação na amplitude de maré, e aplicou-se o modelo de Wrigth & Short (1984) nestas praias. Utiliza-se RTR na classificação de praias de meso e macromarés, que considera as variações na amplitude da maré de sizígia (TR) em relação à altura das ondas na zona de arrebentação (Hb).

$$RTR = (TR/Hb)$$

(1)

As condições do ambiente praias, para os valores de RTR<3 (Masselink 1993), se assemelham às da classificação de Wright & Short (1984), portanto fez-se uso desta. Valores de RTR<7 e  $\Omega=3$  (estágio intermediário banco/corrente de baixa-mar); RTR<15 e  $\Omega=5$  (estágio morfodinâmico ultradissipativo); RTR>15 (transição para estágio de planície de maré), o que não foi observado nas praias da PCA. No modelo de Masselink (1993), o estágio é função da amplitude relativa da maré (RTR), e do Parâmetro Adimensional Ômega ou de Dean ( $\Omega$ ) <sup>(2)</sup> de Wright & Short (1984), foi utilizado nas praias da PCA onde Hb (altura da onda na arrentação), T (período da onda), e Ws (velocidade de decantação do sedimento).

$$\Omega = (Hb/Ws.T)$$

(2)

Foram feitos estudos das medidas de declividade da zona de intermaré e largura média das praias da PCA. Para os valores de  $\Omega$  (Wright & Short 1984), os estados morfodinâmicos

são:  $\Omega < 1,5$  (reflectivo);  $\Omega > 5,5$  (dissipativo), e  $\Omega$  entre 1,5 e 5,5 (intermediário). Os resultados foram utilizados para calcular o balanço sedimentar, as condições morfodinâmicas, a mobilidade sedimentar e a taxa de erosão e acreção.

O parâmetro de escala de surfe  $\Omega$  <sup>(3)</sup> de Guza & Inman (1975), tem três estágios morfodinâmicos:  $\Omega < 2,5$  (refletivo);  $2,5 < \Omega < 20$  (barra e calha longitudinal); e  $\Omega > 20$  (dissipativo). Onde  $a$  (altura da onda incidente),  $\delta$  (radiano de frequência angular  $2\pi/T$ ),  $T$  (período da onda),  $g$  (constante gravitacional) e  $tg\beta$  (gradiente topográfico praiar).

---


$$\Omega = (a\delta^2) / (g \, tg^2 \beta)$$

(3)

O estudo estimativo do nível de energia das praias da PCA, foi baseado em Gibbs *et al.* (1971) e Baba & Komar (1981), com a equação sugerida por Komar (1983), para o cálculo de  $\Omega$ , a velocidade de queda das partículas sedimentares ( $s$ ), foi extraída da tabela de Raudkivi (1990). A profundidade de fecho ( $hc$ ) a longo termo, depende das características locais das praias, utilizou-se a alternativa ( $hc=1,57H_e$ ) de Birkemeier (1981). A verificação das alterações métricas na linha de costa e no volume sedimentar, entre os perfis, foi feita no Surfer 8.0, para a modelagem morfodinâmica e cálculo do volume de sedimentos (Silva Filho 2004). Os cálculos estatísticos morfodinâmicos foram feitos no aplicativo ISRP.

A morfologia dos sistemas de barra e calha da PCA foi analisada por medidas e comparação dos perfis e dados oceanográficos de acordo com a classificação de (Masselink *et al.* 2006, 2007, 2009).

#### 4.3 VARIAÇÃO MORFOLÓGICA E MODELO DAS PRAIAS NA PLANÍCIE COSTEIRA DE ALMOFALA

Todas as praias obtiveram baixos gradientes topográficos, com declividades médias de relevo plano. A praia de Almofala obteve  $tg\beta$  variando de 0,048 a 0,215 (Tabela 1), com os maiores gradientes na quadra seca, extensões de 80 m à 215 m, e acreção de 62,83 m<sup>3</sup>.

A praia da Barreira com  $tg\beta$  de 0,024 a 0,099 (Tabela 1), com os maiores gradientes topográficos na quadra seca, variando de 50 m à 240 m. Nesta praia predominou a erosão de - 64,5 m<sup>3</sup>, somando as três estações analisadas.

Na praia de Torrões o gradiente  $tg\beta$  variou de 0,064 a 0,249 (Tabela 1), com maiores gradientes, com  $tg\beta$  0,249 na quadra seca, do que as praias de Almofala e da Barreira. A praia variou em extensão 90 m a 330 m, com erosão de março a novembro de 2007 de  $-72 \text{ m}^3$ .

Tabela 1. Gradientes topográficos nas praias de Almofala (PA), da Barreira (PB) e de Torrões (PT)

Gradientes Topográficos $tg\beta$ de Almofala			
Perfis	Chuvoso	Intermediário	Seco
PA1	0,087	0,079	0,103
PA2	0,097	0,059	0,143
PA3	0,080	0,048	0,215
PA4	0,125	0,142	0,146
PA5	0,135	0,137	0,143
Gradientes Topográficos $tg\beta$ da Barreira			
PB1	0,036	0,039	0,049
PB2	0,037	0,040	0,048
PB3.1	0,048	0,057	0,099
PB3.2	0,038	0,050	0,051
PB4.1	0,033	0,041	0,045
PB4.2	0,036	0,042	0,044
PB5.1	0,024	0,036	0,040
PB5.2	0,026	0,038	0,041
Gradientes Topográficos $tg\beta$ de Torrões			
PT1	0,065	0,056	0,085
PT2	0,084	0,064	0,249
PT3	0,093	0,087	0,128
PT4	0,075	0,043	0,055

As praias com regime de meso-maré como as de Rossnowlagh, Narin, Magheraroarty, e Downings (Jackson *et al.* 2005) apresentaram baixos gradientes topográficos, RTR dominado por ondas, e estágios dissipativos de acordo com o parâmetro *Dean*. As praias da PCA apresentaram estágios dissipativos, de acordo com o parâmetro  $\hat{\Omega}$ .

As praias de Ajuruteua e Bragança, norte do Brasil (Alves & El-Robrini 2004), com regime de macromaré, possuem comportamento dissipativo, nos parâmetros RTR e  $\Omega$ , e presença de bancos arenosos paralelos à costa.

Nas praias da PCA parâmetro RTR de Masselink (1993) definiu onda dominante, variando de 2,370, 1,282 e 1,167 (Almofala), 2,133, 1,190 e 1,556 (Barreira), 2,667, 1,667 e

1,697 (Torrões) nas quadras chuvosa, intermediária e seca, respectivamente. Pôde-se aplicar nas praias da PCA a classificação dos estágios de acordo com os parâmetros:  $\square$  de Guza & Inman (1974), e  $\Omega$  de Wright & Short (1984).

Na praia de Almofala, o parâmetro  $\square$  resultou em estágios de barra e calha longitudinal na parte oeste, e refletivo na parte leste, na quadra chuvosa (Figura 2). Na quadra intermediária a praia comportou-se como barra e calha longitudinal.

Na praia da Barreira o parâmetro  $\square$  resultou em estágio refletivo na quadra chuvosa, na parte sul (canal de maré) (Figura 6), e secundariamente, barra e calha longitudinal no canal de maré e na parte leste da praia, localizado na ponta do cordão litorâneo. A praia de Torrões ( $\square$ ) comportou-se como barra e calha longitudinal 3 quadras (Figura 10).

Para o modelo  $\Omega$  a praia de Almofala resultou em terraço de maré baixa, ocorrendo também praia e barra em cúspide, e retorno e barras transversais. Na quadra intermediária foi terraço de maré baixa, com ocorrência de barra e calha longitudinal, e praia e barra em cúspide. Na quadra seca a praia foi dissipativa (Figura 2), ocorrendo barra em cúspide e retorno e barra transversal, na parte oeste.

A praia da Barreira mostrou-se barra em cúspide ( $\Omega$ ) (Figura 6) na quadra chuvosa, e dissipativo. Nas quadras intermediária e seca a praia mostrou-se dissipativa, com ocorrência de terraço de maré baixa e praia e barra em cúspide na quadra seca.

A praia de Torrões ( $\Omega$ ) resultou em barra e calha longitudinal na parte oeste, e retorno e barras transversais a leste, na quadra chuvosa (Figura 10). Nas quadras intermediária e seca a praia possuiu estágio dissipativo.

Os cordões arenosos (*strandplains*) da praia da Barreira com fontes sedimentares marinhas derivados de ambos transportes *onshore* ou *longshore* (Masselink *et al.* 2006, 2009), no entanto, na praia da Barreira, eles preservam uma posição principal da linha de costa, marcada por fácies *seaward*.

Na praia de Torrões, o delta possui fontes de sedimentos fluviais, seguidas durante progradação por planícies aluviais (Masselink *et al.* 2006). Na praia de Torrões foram observadas *Intertidal sand waves* com frágeis barras sinuosas paralelas à linha de costa.

As barras de cristas de baixa amplitude (*Low-amplitude ridges*) ocorrem em série de barras paralelas a costa (2–6), como as que ocorrem nas praias de Almofala e de Torrões, que são dissecadas por canais (calhas) perpendiculares a costa, e são formadas sob a influência de condições de ondas calmas ( $H_s < 0,5$  m) (Masselink *et al.* 2006, 2009).

### 4.3.1 Praia de Almofala

A praia de Almofala na parte oeste apresentou 145 m de largura nas quadras chuvosa, 130 m intermediária, e 125 m na seca (Figura 2). O maior volume observado foi na quadra seca com 245,5 m<sup>3</sup>, com acreção de 7 m<sup>3</sup> na intermediária, e 4 m<sup>3</sup> na seca.

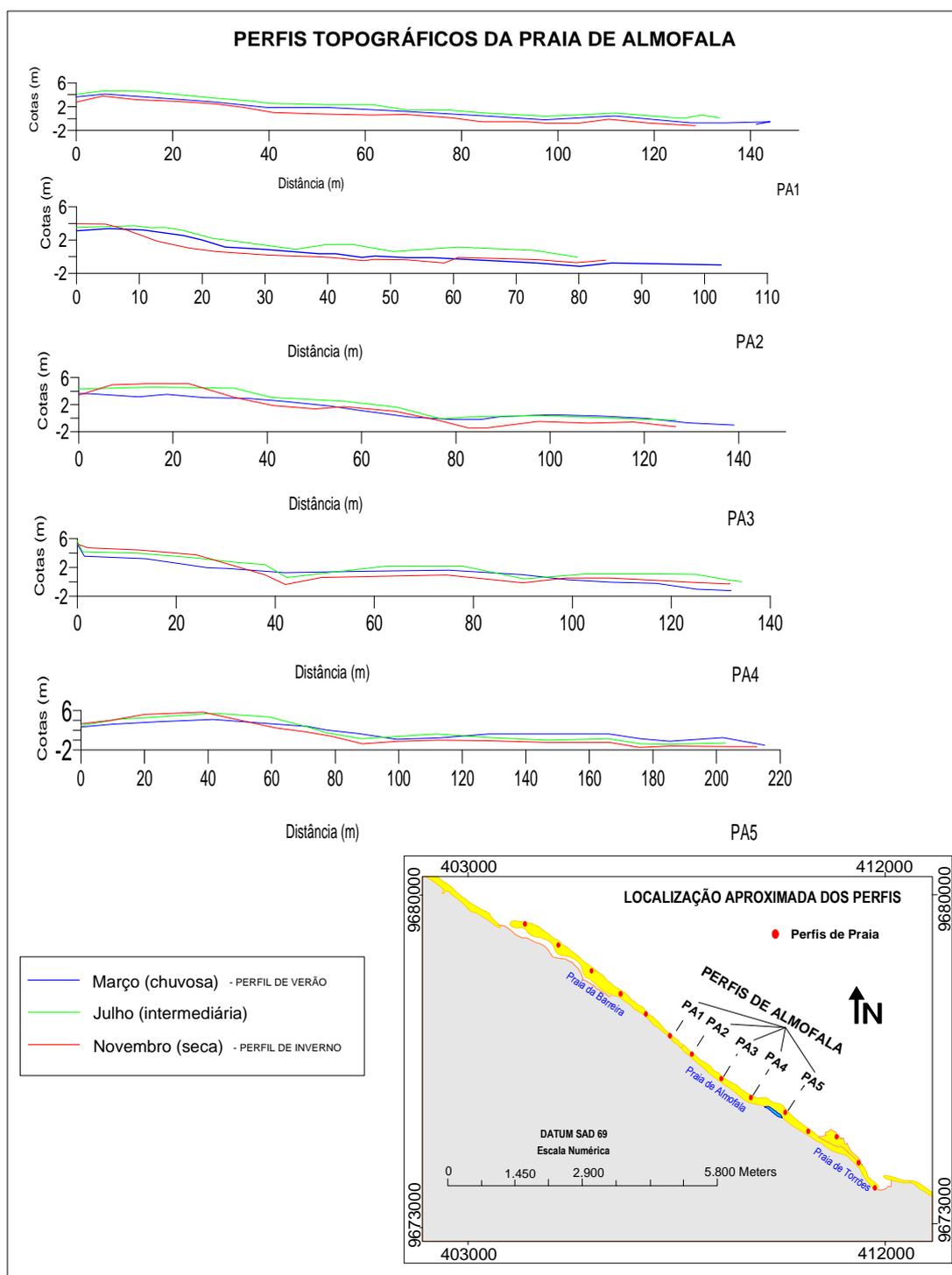


Figura 2. Perfis topográficos na Praia de Almofala, e variação da morfologia praias nas quadras chuvosa (março), intermediária (julho) e seca (novembro).

No ponto (PA2) a largura variou de 80 m na quadra intermediária, a 103 m, na quadra chuvosa (Figura 2). Na quadra seca o volume de sedimentos foi de 259,89 m<sup>3</sup>, erosão de -24,72 m<sup>3</sup>, com paleomangue aflorando, e formação de barras e calhas (Figura 3).

Na parte leste da praia de Almofala (PA3) variou de 127 m nas quadras intermediária e seca (Figura 2), e 140 m na quadra chuvosa, com extensa zona de supramaré, e sistema barra calha nas zonas de intermaré e inframaré (Figura 4), nas três quadras. O maior volume de sedimentos foi na quadra seca com 299,13 m<sup>3</sup>, com acreção de 11,79 m<sup>3</sup>.

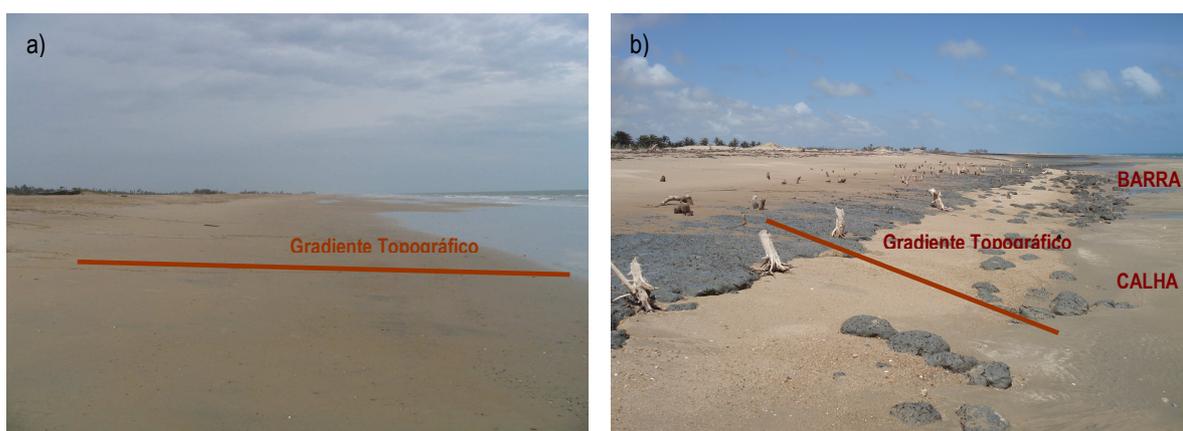


Figura 3. Variação da praia de Almofala (PA2) na quadra chuvosa (a); alto gradiente topográfico na zona de estirâncio (quadra seca), com paleo-mangue (b).

A parte leste da praia (PA4) próximo a plataforma de abrasão variou pouco em largura de 137 a 138 m (Figura 2). O volume de sedimentos foi 225,07 m<sup>3</sup> (março), acreção de 13,83 m<sup>3</sup> (julho), e erosão -14,3 m<sup>3</sup> (novembro), e possui barra e calha (Figura 4).



Figura 4. Parte leste da Praia de Almofala (PA3), novembro (a); e (PA4) em julho (b).

A leste da plataforma de abrasão de Almofala (PA5) tem uma seqüência de laguna costeira por fechamento de barras, seguida de zona de supra-maré com berma, e zona de inter-

maré com sistema de barra e calha (Figura 5), ultrapassando os 200 m nas três quadras e tendo a menor variação na largura (Figura 2).

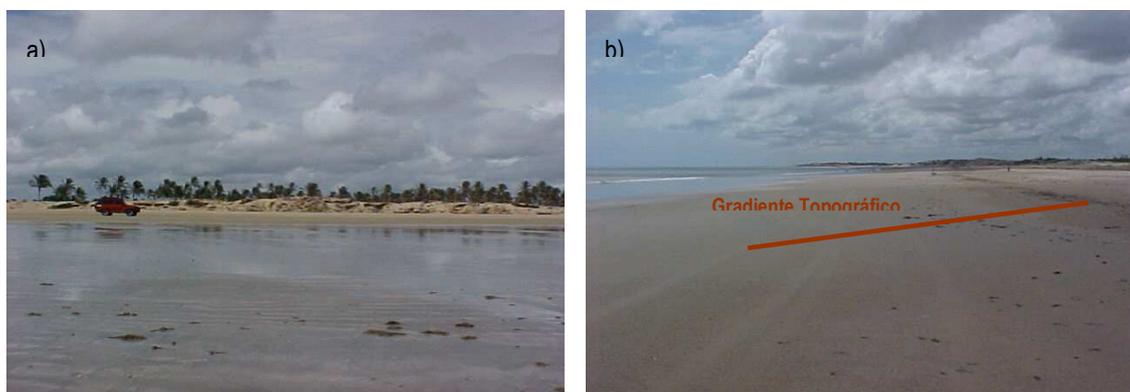


Figura 5. Praia de Almofala (PA5), na quadra chuvosa (a); e seu gradiente topográfico no início da zona de infra-maré, na quadra intermediária (b).

#### 4.3.2 Praia da Barreira

Na parte leste da praia da Barreira (PB1) em novembro mediu 150m de largura, em março e julho ultrapassaram mais de 140 m de largura (Figura 6). O volume foi em novembro foi de 242,7 m<sup>3</sup>, com acreção de 7,1 m<sup>3</sup> na quadra intermediária, e 1 m<sup>3</sup> na seca (Figura 7). No início do cordão litorâneo (PB2) a praia variou pouco entre as quadras, medindo em torno de 140 m de largura (Figura 6), em março o volume foi de 256,7 m<sup>3</sup>, erodindo -7,8 m<sup>3</sup> em julho, com acreção de 5 m<sup>3</sup> em novembro.

Na barra (PB3) de 150 m nas três quadras, inicia ao sul o canal de maré (PB3.1), na com volume de 179,5m<sup>3</sup>, na quadra chuvosa, erodindo -9,5 m<sup>3</sup> na intermediária, e crescendo 4,8 m<sup>3</sup>. Ao norte (PB3.2) em torno de 155 m de extensão, na quadra chuvosa possuiu 143,2 m<sup>3</sup>, com acreção de 5,8 m<sup>3</sup> até a quadra seca (Figura 6).

Na parte oeste da praia da Barreira (PB4) a barra arenosa mediu 240 m de extensão, iniciando no canal de maré (Figura 6). Possui zona de inter-maré e intermaré, barras e calhas, erodindo -12 m<sup>3</sup> na intermediária, e -11 m<sup>3</sup> na seca ao sul, e ao norte com 140 m, e volume de 238 m<sup>3</sup> na quadra chuvosa, erodiu -9,1 m<sup>3</sup> na intermediária, e cresceu 10 m<sup>3</sup> na seca.

Na ponta da barra (PB5) (Figura 6) a largura máxima foide 240 m em março. Os volumes ao sul (PB5.1) tiveram valores de 137,3 m<sup>3</sup> na quadra chuvosa, crescendo 4,8 m<sup>3</sup> até a quadra seca, e ao norte (PB5.2) com 238,3 m<sup>3</sup> em março, erodiu -15,1 m<sup>3</sup> em julho, e cresceu 4,3 m<sup>3</sup> em novembro.

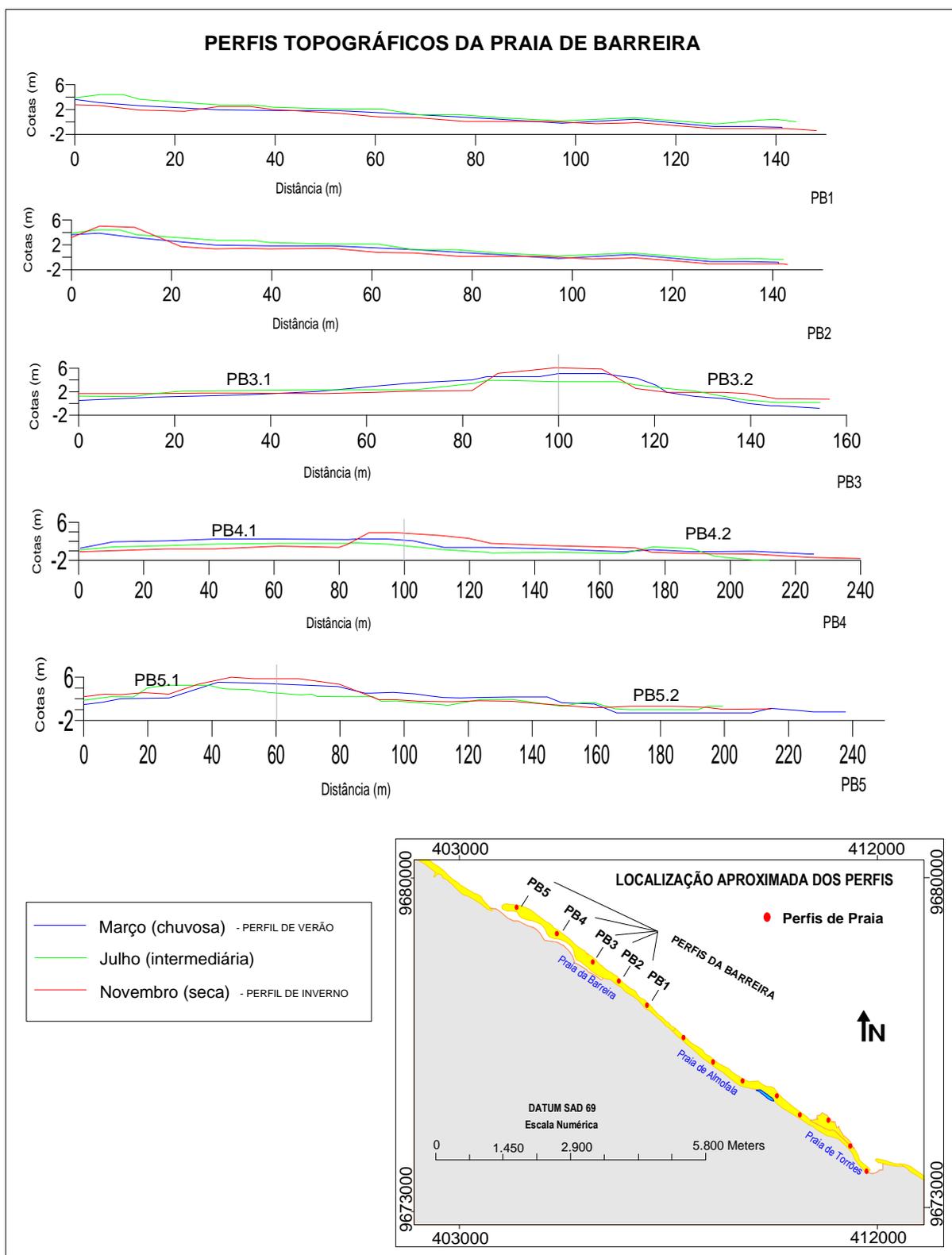


Figura 6. Perfis topográficos da Praia da Barreira, e a variação da morfologia praias nas quadras chuvosa (março), intermediária (julho) e seca (novembro).



Figura 7. Praia da Barreira (PB1).



Figura 8. Ponta do cordão litorâneo da praia da Barreira (PB5).

#### 4.3.3 Praia de Torrões

O primeiro ponto a oeste na praia de Torrões (PT1) possui baixo gradiente topográfico, e pouca variação na extensão aproximando-se dos 90 m nas quadras. O volume de sedimentos na quadra chuvosa foi 189,20 m<sup>3</sup>, erodiu -7,59 m<sup>3</sup> na quadra intermediária, e -12,69 m<sup>3</sup> na seca.

A parte oeste da praia (PT2) é a mais extensa de todas as praias da PCA, com muitas barras (Figura 9), sendo mais larga em novembro com quase 330 m (Figura 10), com alto volume de sedimentos 422,52 m<sup>3</sup> na quadra chuvosa, progradando 19,82 m<sup>3</sup> na intermediária, e erodindo -38,82 m<sup>3</sup> na seca. Em julho a praia foi menos extensa e ultrapassou 300 m e com sistema barras e calhas, bem desenvolvidas (Figura 9).

A leste a praia (PT3) teve o maior gradiente topográfico, principalmente na transição entre a zona de supramaré e de inframaré. O volume de sedimentos maior foi em julho, com 161,1 m<sup>3</sup>, com maior largura, com 109 m (Figura 10), erodindo -13 m<sup>3</sup> na quadra seca, e menos extensa na quadra chuvosa com 90m de largura, e sistema de barra e calha (Figura 11).

A praia na foz do Rio Aracatimirim (PT4) teve as maiores variações de extensão entre as quadras sazonais, sendo mais extensa na quadra seca >180 m (Figura 10), e menos extensa na quadra chuvosa com 93 m, volume 218,1 m<sup>3</sup> e estágio de retorno e barra transversal. Na quadra intermediária a praia cresceu 4,8 m<sup>3</sup>, estágio de praia e barra em cúspide, e formação de barra e calha, com acréscimo de 23,7 m<sup>3</sup> e estágio dissipativo na quadra seca.



Figura 9. Praia de Torrões (PT2) na transição da zona de supramaré, para a zona de intermaré, com sistema de barras e calhas.

A maior atuação dos ventos alísios no mês de novembro causa uma maior formação de sistema barras e calhas, por maior atuação das ondas nas zonas de intermaré e inframaré. As barras da praia de Torrões são de cristas de baixa amplitude, pela sua morfodinâmica de série de sistemas de barras intermarés, e não estão relacionadas com a maré, mas sim com a dissipação da energia das ondas incidentes.

As correntes longitudinais também atuam diretamente na formação das barras e calhas da praia de Torrões, juntamente com as ondas, formam esse sistema na zona de infra-maré, e na zona de inter-maré, nas marés altas.

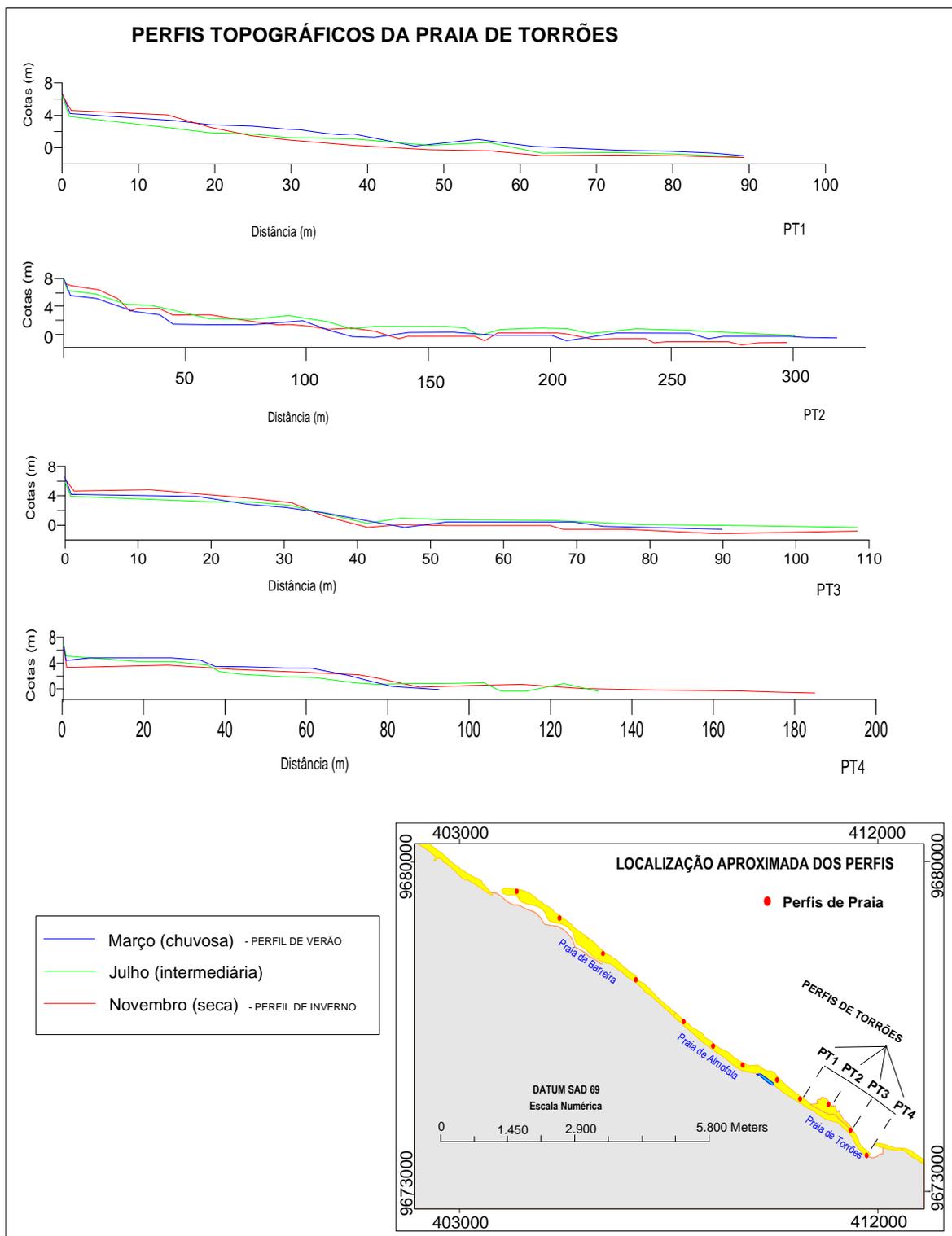


Figura 10. Perfis topográficos da Praia de Torrões, e a variação da morfologia praias nas quadras chuvosa (março), intermediária (julho) e seca (novembro).



Figura 11. Praia de Torrões (PT3) próximo a foz do Rio Aracatimirim, com sistema de barra e calha.

#### 4.4 VARIABILIDADE MORFOLÓGICA E GRANULOMÉTRICA SAZONAL DAS PRAIAS NA PCA

A variação da posição da linha de maré alta (LMA) foi observada pelas fases erosivas e acrecionais da LMA, das praias de Almofala, da Barreira e de Torrões durante as quadras climáticas, e maiores marés de sizígia. Em fase erosional, as linhas de maré alta (LMA) migraram para a parte superior destas praias, diminuindo as zonas de pós-praia, e a fase acrecional caracterizou-se por aumento desta zona.

Os parâmetros estatísticos de Folk & Ward (1957) foram utilizados na identificação das características granulométricas dos sedimentos praias: média, mediana, seleção, assimetria e curtose.

As relações entre o tamanho do sedimento e a mobilidade praias: praias dissipativas, de baixa declividade, com extensas zonas de surfe tipicamente arenosas, exibem rápidas variações texturais e de transporte como em alguns pontos na Praia do Futuro (Albuquerque *et al.* 2009), enquanto nas praias reflectivas com sedimentos mais grosseiros, o transporte é mais limitado.

##### 4.4.1 Praia de Almofala

Na praia de Almofala a LMA migrou em média de 8m entre as quadras, com largura média de 6m nas zonas de pós-praia. O predomínio da acreção foi observado na quadra

intermediária, com leve aumento da zona de pós-praia da LMA (Figuras 2, 12), com acresção na parte leste, e erosão desta zona na parte oeste.

Na praia de Almofala a média granulométrica indicou areia fina (46%) (quadra chuvosa) e secundariamente areia média (44%), moderadamente selecionada (76%), assimetria muito positiva (38%) e a curtose foi mesocúrtica (68%), com areia média (58%) (na quadra intermediária), e areia fina (51%) (na quadra seca) (Figura 12).

No entanto a variação entre as zonas não é homogênea, na zona de supramaré da praia possui areia fina (73%) (na quadra chuvosa), areia média (67%) (na quadra intermediária), e areia fina (67%) (na quadra seca) (Figura 12).

A zona de intermaré possui areias média (55%) (quadra chuvosa), areia fina (48%) e média (48%) (intermediária), e areia fina (51%) (seca), além de silte grosso (11%) e silte médio (6%) na parte oeste da praia. A ocorrência de silte nesse ponto da praia é devido ao paleomangue, que nessa quadra foi exposto por causa da ação das marés e das ondas, e do baixo suprimento de sedimentos pelos rios (Figura 3b).

Na zona de inframaré, na quadra chuvosa, ocorreu areia muito fina (50%) e areia média (50%), na quadra intermediária areia média (75%), seguida de areia seguida de areia muito fina (25%). Enquanto, na quadra seca, teve areia média (50%), seguida de areia fina e areia muito fina (25% cada).

O grau de selecionamento dos sedimentos da praia de Almofala apresentou-se moderadamente selecionado (73%), em todas as quadras, em todas as zonas de praia.

A assimetria na praia de Almofala comportou-se positiva (33%), este parâmetro é sensível ao ambiente, quando a assimetria é negativa indica erosão, enquanto a positiva predomínio de deposição Ponçano (1986). A curtose comportou-se mesocúrtica (55%) em todos as quadras e zonas praias, e está relacionada ao nível de energia das ondas ou do ambiente deposicional, sendo inversamente proporcional (Alves 2001).

#### **4.4.2 Praia da Barreira**

Na praia da Barreira a LMA teve migração média de 7m, com uma largura média de 4m as zonas de pós-praia. A erosão predominou na parte central e leste, na quadra intermediária, com recuo da zona de pós-praia da LMA (Figuras 6, e 13) e leve acresção (quadra seca) na ponta da barra (oeste).

A praia da Barreira possui areia média (29%), com altos valores de areia fina (28%) e areia muito fina (28%). Sazonalmente, ocorreu areia média (36%), com areia fina (24%), e

silte grosso (15%) na quadra chuvosa, areia muito fina (33%) (intermediária) e areia média (32%) (seca) (Figura 13).

Na zona de supramaré da praia da Barreira ocorreu areia média (65%) (chuvosa) (Figura 13), areia fina (55%) (intermediária), e areia fina (58%) (seca). Na zona de intermaré teve areia muito fina nas três quadras: chuvosa (28%), intermediária (41%), e seca (36%), e areia muito fina na zona de inframaré: chuvosa (50%), intermediária (83%), e seca (67%).

O grau de selecionamento dos sedimentos da praia de Almofala apresentou-se moderadamente selecionado (73%), em todas as quadras, predominando em todas as zonas de praia. A assimetria na praia da Barreira foi muito negativa (46%), indicando erosão, e curtose muito leptocurtica (39%), valor médio para todas as quadras e zonas praias.

#### **4.4.3 Praia de Torrões**

A praia de Torrões a LMA migrou em média 25m, com largura média de 16m nas zonas de pós-praia. A erosão predominou na quadra seca, na foz do rio Aracatimirim (leste) com considerável recuo da zona de pós-praia, e escarpas de praia, na LMA (Figuras 10, e 14).

Na praia de Torrões possuiu areia fina (36%), seguida de silte grosso (28%) (chuvoso), com areia fina (38%) (intermediário), e areia fina (37%) (seco). Na praia de Torrões na zona de supramaré (Figura 14) ocorreu de areia fina (44%) (chuvosa), areia fina (55%) (intermediária), e areia fina (58%) (seca). Na zona de intermaré predominou silte grosso (48%) (chuvosa), areia fina (57%) (intermediária), e silte grosso (51%) (seca). Na zona de inframaré com mais silte grosso (50%) (chuvosa), areia muito fina (75%) (intermediária), e areia muito fina (50%) (seca).

O grau de selecionamento dos sedimentos na praia de Torrões apresentou-se moderadamente selecionado (60%), valor médio para todas as quadras, e todas as zonas praias. A assimetria no geral foi muito negativa (36%), indicando erosão, e a curtose comportou-se muito leptocurtica (29%).

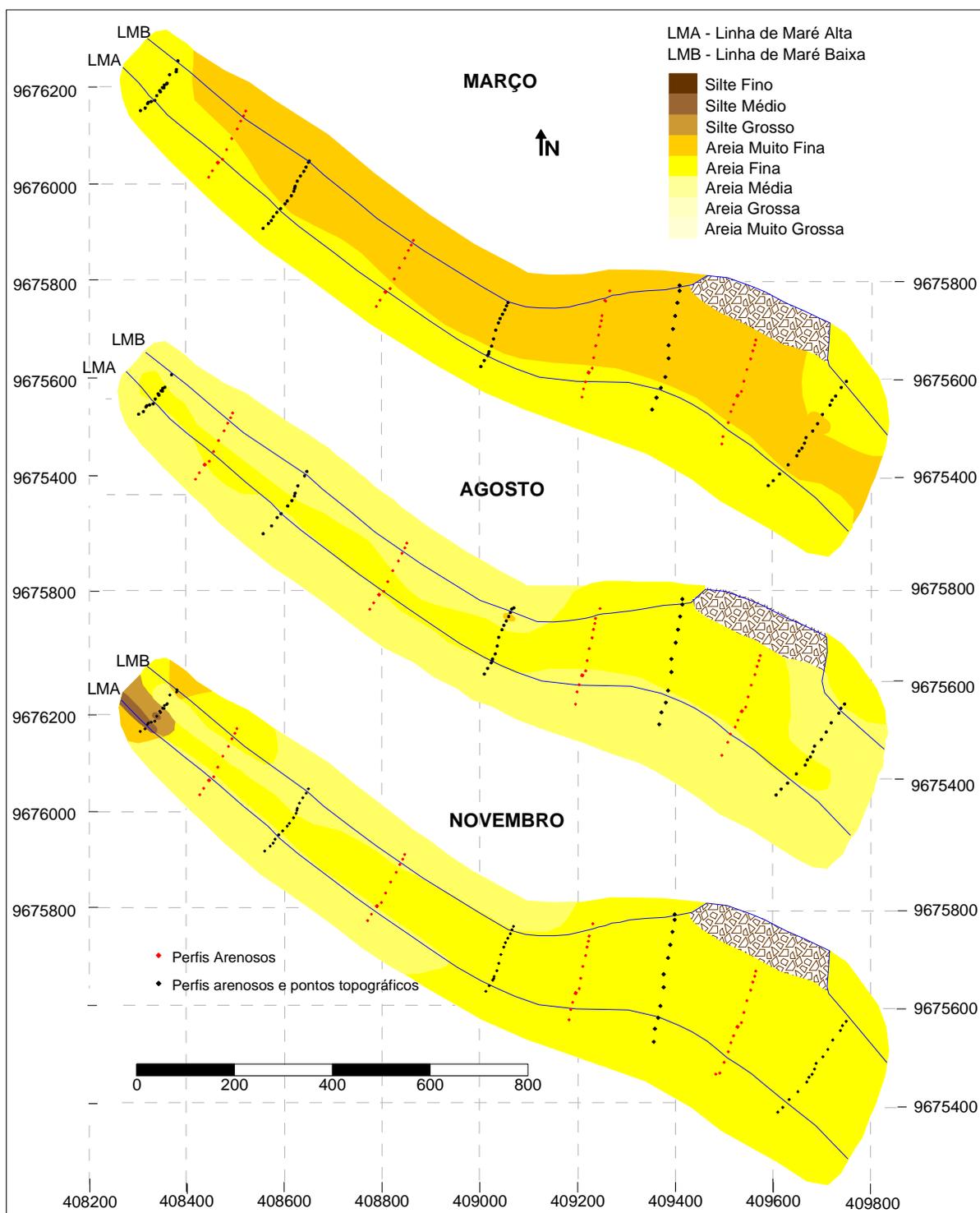


Figura 12. Distribuição horizontal de sedimentos na praia de Almofala durante as quadras chuvosa, seca e intermediária.

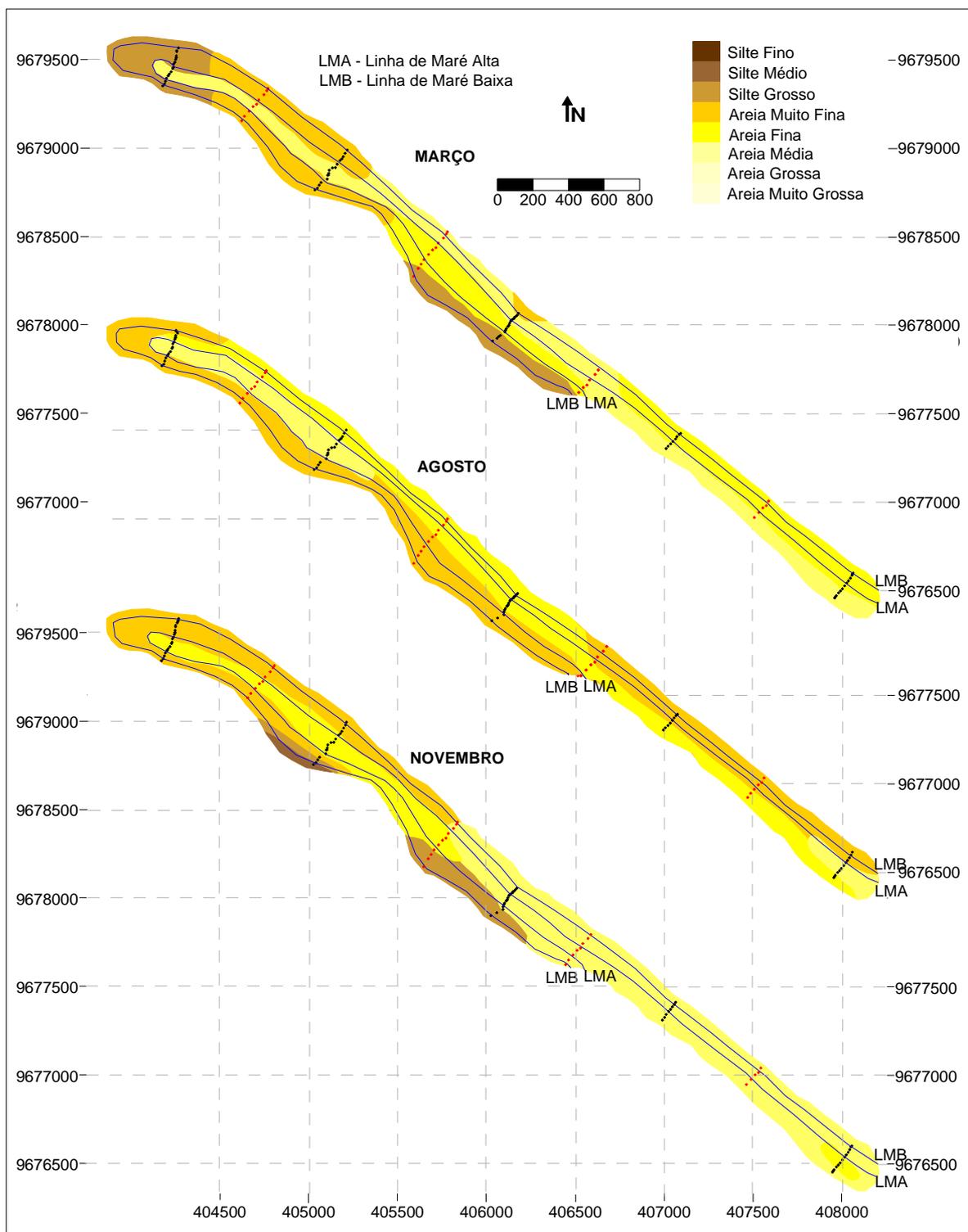


Figura 13. Distribuição horizontal de sedimentos na praia da Barreira durante as quadras chuvosa, seca e intermediária.

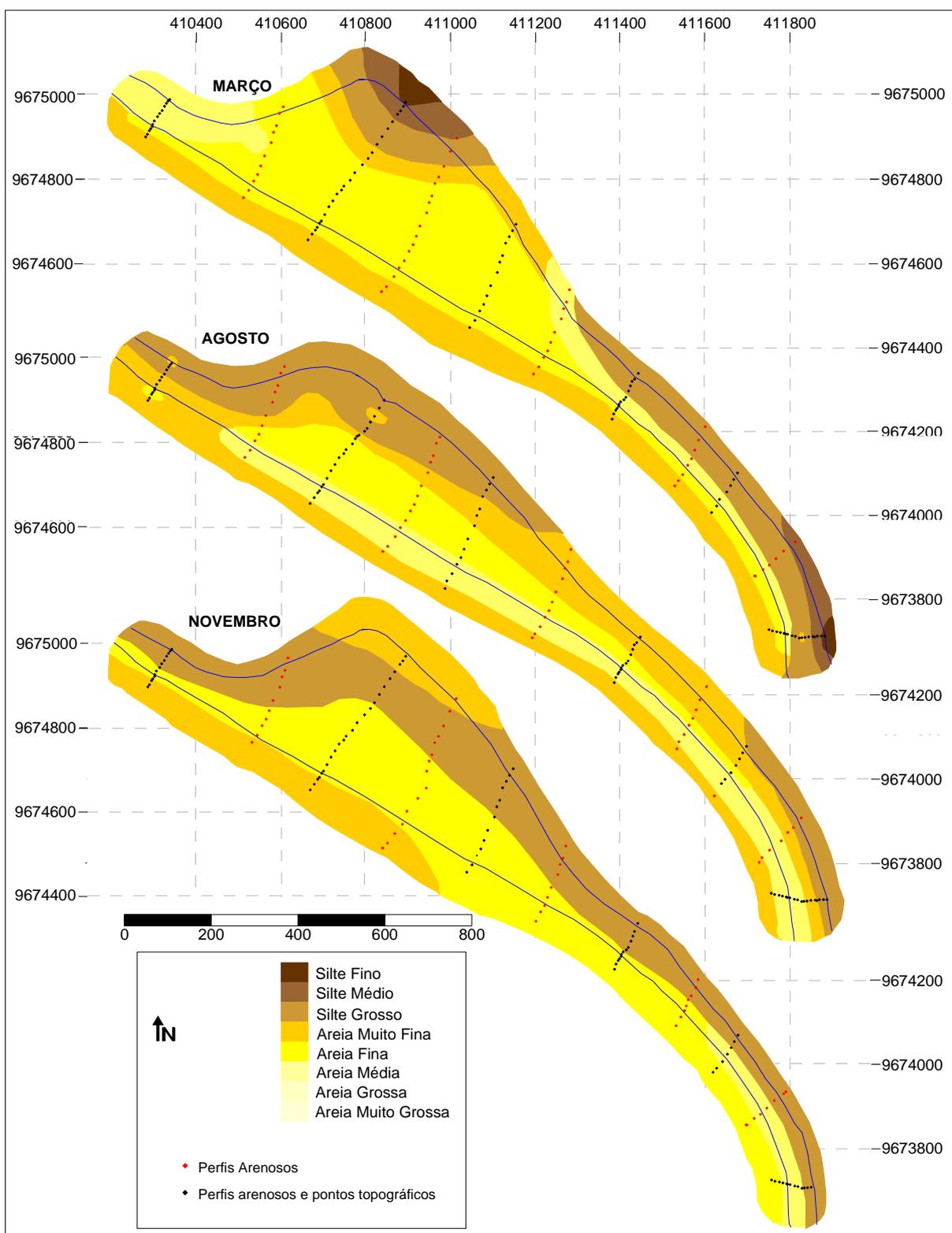


Figura 14. Distribuição horizontal de sedimentos na praia de Torrões durante as quadras chuvosa, seca e intermediária.

#### 4.5 VARIABILIDADE DO VOLUME SEDIMENTAR SAZONAL DAS PRAIAS NA PCA

A quadra chuvosa foi o mês de referência para a análise da variação do volume sedimentar, os valores de variação de volume ( $m^3$ ) positivos indicam acreção, e os negativos, erosão.

A praia de Almofala apresentou predomínio de acreção com  $62,83 m^3$  somando as três estações analisadas (fase acrecional no mês de julho), apresentando índices de erosão de  $-48,04 m^3$ , e erosional em novembro.

Na parte leste (PA4) apresentou os maiores volumes de sedimentos com pico no mês de novembro  $304,10 m^3$ , apresentando acreção. Na quadra chuvosa com maior volume  $299,80 m^3$ , erodiu  $-5,3 m^3$  até a quadra intermediária. Da quadra chuvosa para a intermediária ocorreu uma acreção total de  $37,34 m^3$ , com erosão ( $-8,98 m^3$ ), enquanto da quadra intermediária para a seca ocorreu erosão ( $-39,06 m^3$ ), com acreção de  $25,49 m^3$ .

A praia da Barreira apresentou erosão de  $-64,5 m^3$  (fase erosional no mês de julho), e acrecional no mês de novembro. O volume observado no PB1 no mês de novembro foi  $242,7 m^3$ , apresentando acreção de  $7,1 m^3$  na quadra intermediária, e  $1 m^3$  na seca. No perfil PB2 o maior volume observado foi no mês de março com um volume de  $256,7 m^3$ , erodindo  $-7,8 m^3$  em julho, com acreção de  $5 m^3$  em novembro.

Na praia da Barreira (PB3.1) ao sul, na quadra chuvosa o volume foi de  $179,5 m^3$ , erodiu  $-9,5 m^3$  na intermediária, e cresceu  $4,8 m^3$  na seca, enquanto, ao norte (PB3.2) na quadra chuvosa com  $143,2 m^3$ , cresceu de  $5,8 m^3$  no seco. Na parte oeste no canal da Barreira (PB4.1) erodiu  $-12 m^3$  na quadra intermediária, e  $-11 m^3$  no seco, e ao norte (PB4.2) com  $238 m^3$  na quadra chuvosa, erodiu  $-9,1 m^3$  na intermediária, e cresceu  $10 m^3$  na seca. Na ponta da barra (PB5.1) com  $137,3 m^3$  na quadra chuvosa, cresceu  $4,8 m^3$  (quadra seca). Ao norte (PB5.2) com  $238,3 m^3$  (março), erodiu  $-15,1 m^3$  (julho), e cresceu  $4,3 m^3$  (novembro).

A praia de Torrões variou em extensão nos perfis de 90 m a 330 m, apresentando predomínio de erosão de março a novembro de  $-72 m^3$  (fase erosional), em 2007. O volume de sedimentos na quadra chuvosa foi  $189,20 m^3$ , erodindo  $-7,59 m^3$  na quadra intermediária, e na quadra seca  $-64,51 m^3$ .

A parte mais extensa da praia de Torrões (PT2) apresentou alto volume de sedimentos  $422,52 m^3$  na quadra chuvosa, progredindo  $19,82 m^3$  na intermediária, e erodindo  $-38,82 m^3$  na seca. A leste (PT3) com  $161,1 m^3$  em julho, erodiu  $-13 m^3$  na quadra seca. Na foz do Rio Aracatimirim (PT4) na quadra chuvosa o volume de sedimentos foi de  $218,1 m^3$ , com acreção  $4,8 m^3$  na quadra intermediária, e  $23,7 m^3$  na seca.

## 4.6 DISCUSSÕES

Modelos morfodinâmicos de estágios praias são muito utilizados na predição de praias oceânicas (Wright *et al.* 1982, Wrigth & Short 1984, Jackson *et al.* 2005, Masselink *et al.* 2006, 2009), onde praias dissipativas muitas vezes estão relacionadas ao aporte de sedimentos pelos rios, principalmente em praias de regime de macro-marés. Nossos resultados mostram que as praias semi-expostas da PCA apresentam estágios dissipativos em regime de meso-maré, que estão relacionadas ao controle geológico da área.

A PCA possui praias arenosas, sobrepostas a uma plataforma de abrasão da Formação Barreiras, ligada a uma inflexão. No geral as praias são extensas e possuem estágios dissipativos, associados aos baixos declives na parte emersa, com areias finas, e uma plataforma continental interna de baixo declive.

No geral nas quadras secas das praias (Almofala, Barreira e Torrões) com uma maior atuação dos ventos alísios, pode-se perceber uma maior formação de sistema barras e calhas, por maior atuação das ondas nas zonas de intermaré e inframaré no mês de novembro. Os perfis foram mais altos nas zonas de supramarés devido a maior intensidade dos ventos nessa quadra que remobiliza os sedimentos da zona de intermaré para essas zonas.

As praias comportaram-se menos extensas na quadra intermediária, e apresentaram maior extensão na quadra chuvosa, com zona de supramaré mais baixa e zona de intermaré com menor formação de sistema barra e calha. A praia de Torrões foi a mais extensa de todas as praias em 2007, variando em extensão de 90 m a 330 m, apresentando erosão de  $-38,82 \text{ m}^3$ , e alto volume de sedimentos  $422,52 \text{ m}^3$  na quadra chuvosa, progradando  $19,82 \text{ m}^3$  na quadra intermediária, e erodindo na quadra seca em torno de  $-38,82 \text{ m}^3$ .

As praias da PCA tiveram uma migração da LMA com recuo da linha de costa na Praia de Torrões, com fase erosional na quadra seca, na foz do rio Aracatimirim (leste), e recuo da zona de pós-praia, e escarpas de praia. A praia da Barreira também teve recuo da LMA na zona de pós-praia (quadra intermediária), enquanto a praia de Almofala apresentou avanço da LMA na parte leste (quadra intermediária), com recuo na parte oeste.

As três praias apresentaram RTR com onda dominante. O parâmetro  $\square$  mostrou sistema barra e calha longitudinal nas praias de Almofala e de Torrões, e estágio reflectivo na Barreira. O parâmetro  $\Omega$  apresentou estágios predominantes de terraço de maré baixa na praia de Almofala, e dissipativo nas praias da Barreira e de Torrões, com sistema de barra e calha nas três praias. A praia de Almofala apresentou predomínio de estágio de terraço de maré baixa, sendo comum em praias de regime de meso-maré e micro-maré (CERC 1984).

Segundo Sales (2002) os cordões litorâneos do município de Itarema se formam por cimentação, resquício de vegetação, ou a existência de estruturas ou formações litológicas. Na PCA a formação do cordão litorâneo da praia da Barreira está relacionado a existência da plataforma de abrasão sotoposta, e a resquícios de vegetação soterrados que afloram em quadras de estiagem.

Segundo a classificação de Masselink *et al.* (2006) os cordões arenosos (*strandplains*) estão dispostos paralelos a linha de costa contendo, praias e dunas, encontrados ao longo de costas lineares progradantes e não associadas a embaiamentos. *Strandplains* geralmente preservam múltiplas posições de linhas de costa e são mais marcados por fácies seaward (ao contrário das barras). Formam-se quando a altura da onda sobrepõe a crista da barra ( $H/h > 0,5$ ). Barras de cristas de baixa amplitude (*low-amplitude ridges*) ocorrem como uma série de barras paralelas a costa (2–6) que são dissecadas por canais (calhas) de drenagem perpendicular a costa.

Neste sentido, o cordão litorâneo da praia da Barreira se assemelha aos processos dos “*strandplains*” pelas suas características morfodinâmicas (paralelos a linha de costa contendo praias e dunas). As barras da praia de Torrões são barras de cristas de baixa amplitude, como observadas na sua morfodinâmica de série de sistemas de barras intermarés, que não estão relacionadas com a maré, mas sim com a dissipação da energia das ondas incidentes.

As praias são semi-expostas, com atuação de média energia dos ventos e ondas, e predomínio de erosão nas praias da Barreira ( $-64,5 \text{ m}^3$ ) e de Torrões ( $-72,1 \text{ m}^3$ ), acreção ( $62,83 \text{ m}^3$ ) em Almofala (2007). A praia de Almofala apresentou predomínio de acreção com  $62,83 \text{ m}^3$  no ano de 2007, mesmo com altos índices de erosão de  $-48,04 \text{ m}^3$ , sendo provavelmente beneficiada pelo transporte litorâneo de sedimentos advindos de sudeste, praia de Torrões.

A granulometria apresentou predomínio de areia fina nas praias de Almofala e Torrões, e areia média na praia da Barreira. As areias predominantes foram moderadamente selecionadas em todas as praias indicando média ação de ondas e ventos.

Foi observado uma maior remoção das areias médias da zona de inframaré para a zona de supramaré através dos ventos, na quadra intemediária, que fica mais intenso no final da quadra chuvosa até a quadra seca. A energia dos ventos e das ondas foi menor durante na quadra chuvosa, e contribuiu para a deposição de areia muito fina na zona de estirâncio e na zona de pós-praia nas praias de Almofala e Torrões.

A assimetria na praia de Almofala apresentou comportamento positivo, indicando acreção, coincidindo com os resultados da análise da posição da LMA. Por outro lado, as

Praias da Barreira e de Torrões predominaram assimetria negativa, indicando erosão, coincidindo também com fases erosionais indicadas na posição da LMA das praias. A curvatura predominante nas três praias foi mesocúrtica indicando média atividade dos ventos e ondas. A ocorrência de silte na praia da Barreira se dá na calha do canal de maré que também recebe influência de pequenos córregos que deságuam neste, recortando os mangues, e depositando os sedimentos finos ao longo da parte sul do cordão arenoso.

Estudos na praia da Caponga relevam que é uma praia de estágio intermediário a reflectivo, que vem sofrendo intensos processos de erosão, durante décadas Pinheiro *et. al.* (2006), processo observado também nas praias da PCA. Várias medidas paliativas vêm sendo desenvolvidas nas praias de Caponga, Fortaleza, e Icaraí, como muros de contenção, espigões, e monitoramento para conter a erosão, que em geral dão resultados temporários.

Na praia da Barreira da PCA observa-se no canal de maré medidas simples de contenção da erosão, sem efeito, como sacos de areia e entulhos, para evitar a destruição de barracas e casas. No entanto, o mar continua invadindo, e medidas preventivas devem ser tomadas.

#### 4.7 CONCLUSÕES

As três praias da PCA possuem onda dominante (RTR). A praia de Almofala foi terraço de maré baixa, e nas praias da Barreira e de Torrões foram dissipativas, na análise do parâmetro  $\Omega$ , com sistema de barra e calha nas três praias.

As praias são semi-expostas, com atuação de média energia dos ventos e ondas. As três praias apresentaram RTR com onda dominante. As praias de Almofala e de Torrões tiveram sistema barra e calha longitudinal ( $\square$ ), e estágio reflectivo na Barreira. As praias de Torrões e da Barreira tiveram recuo da linha de costa, com processos de erosão nas praias da Barreira (-64,5 m<sup>3</sup>) e de Torrões (-72,1 m<sup>3</sup>), e acreção (62,83 m<sup>3</sup>) na praia de Almofala (2007).

Medidas paliativas emergenciais para conter a erosão, ou remoção de populações que margeiam a costa oeste de Almofala, e as praias da Barreira e de Torrões devem ser realizadas por parte dos órgãos competentes.

#### 4.8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Albuquerque M. da G., Calliari L.J., Corrêa I.C.S., Pinheiro L. de S. 2009. Morfodinâmica da Praia do Futuro, Fortaleza-CE: uma síntese de dois anos de estudo. *Quaternary and Environmental Geosciences* 01(2): 49-57.

- Alves M. A. M. S. 2001. *Morfodinâmica e sedimentologia da praia de Ajuruteua – NE do Pará*. Belém: Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. (Dissertação de Mestrado)104p.
- Alves M. A. M. & El-Robrini M. 2004. Morphodynamics of a macrotidal beach: Ajuruteua, Bragança North Brazil. *Journal of Coastal Research*, 39 (SI): 949-951.
- Austin M. J., Scott T. M., Brown J. W., Brown J. A., Macmahon J., Masselink G., Russell, P.E., 2010. Temporal observations of rip current circulation on a macro-tidal beach. *Continental Shelf Research*, 30: 1149-1165. [doi:10.1016/j.csr.2010.03.005]
- Baba J. & Komar P. D. 1981. Measurements and analysis of settling velocities of natural quartz sand grains. *Journal of Sedimentary Petrology*, 51 (2): 631-640.
- Baptista P., Bastos L., Bernards C., Taborda R. 2006. *Morphodynamics of Exposed Sandy Beaches*. *Journal of Coastal Research*, Special Issue 39: 355-359.
- Birkemeier W. A. 1981. *Fast accurate two-person beach survey*. *Coastal Engineering Technical Aid* 81-11. U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station. Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, Mississippi. 22p.
- Callaghan D., Ranasinghe R., Short A. 2009. Quantifying the storm erosion hazard for coastal planning. *Coastal Engineering*, 56: 90–93. DOI:10.1016/j.coastaleng.2008.10.003
- COSTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER - CERC. 1984. *Shore Protection Manual*. U.S.Army Corps of Engineers. Washigton: CERC, D.C V.I, 597p, V.II, 603p.
- DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO (DHN). 2006. *Dados Meteorológicos e Oceanográficos da carta 29 (do Quadrado de Marsden 303)*. Disponível em: <http://schemas.openxmlformats.org/package/2006/content-types>. Acesso em: 05 de janeiro 2008.
- DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO (DHN) 2007. *Tábua das marés para o Porto de Pecém e do porto do Mucuripe*. Disponível em: <http://www.mar.mil.br/dhn/chm/tabuas/index.htm> . Acesso em: 05 de janeiro 2007.
- Folk R. L. & Ward C. 1957. Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27 (1): 3-26.
- FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSO HÍDRICOS - FUNCEME. 2008. *Meteorologia e Oceanografia do estado do Ceará*. Fortaleza: FUNCEME. 2008. <http://www.funceme.br/DEMETS/index.htm>. Acessado em 31 dezembro de 2008.
- Gibbs R. T., Mathew M. D., Link D. A. 1971. The relationship between size and sorting velocity. *Journal of Sedimentary Petrology*, 41: 07-18.
- Guza R. T. & Inman D. L. 1975. Edge waves and beach cusps. *Journal of Geophysical Research*, 80 (21): 2997-3012.

- Jackson D. W. T. T, Cooper J. A. G., Rio L. del. 2005. Geological control of beach morphodynamic state. *Marine Geology*. 216: 297–314.
- Li R., Deshpande S., Niu X., Lee I-C., Wu B. 2008. Multi-dimensional geospatial data integration for coastal change analysis. The International Archives of the Photogrammetry, *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Beijing. XXXVII (8) :1311-1316.
- Komar P. D. 1983. *Beach processes and erosion - An Introduction*. In: KOMAR PD (Ed.) Handbook of Coastal Processes and Erosion. Florida: CRC Press, 1: 1-20.
- Masselink G. & Short A. D. 1993. The effect of tide range on beach morphodynamics and morphology: a conceptual beach model. *Journal of Coastal Research*, 9 (3): 785-800.
- Masselink G., 1993. Simulating the effects of tides on beach morphodynamics. *Journal Coastal Research*, 15: 180-197.
- Masselink G., Kroon A., Davidson-Arnott R. G. D. 2006. Morphodynamics of intertidal bars in wave-dominated coastal settings - A review. *Geomorphology*, 73: 33–49  
www.sciencedirect.com
- Masselink G., Auger N., Russell P., O'hare T. 2007. Short-term morphological change and sediment dynamics in the intertidal zone of a macrotidal beach. *Sedimentology*, 54: 39–53. DOI: 10.1111/j.1365-3091.2006.00825.x
- Masselink G., Russell P. E., Turner I. L., Blenkinsopp C. E., 2009. Net sediment transport and morphological change in the swash zone of a high-energy sandy beach from swash event to tidal cycle time scales. *Marine Geology*, 267: 18-35. doi:10.1016/j.margeo.2009.09.003
- Muehe D. 2001. Critérios Morfodinâmicos para o Estabelecimento de Limites da Orla Costeira para fins de Gerenciamento. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 2 (1): 35-44.
- Pinheiro L. S., Morais J. O., Medeiros C.; Pitombeira E. S. 2006. The gabions for the protection of Caponga Beach, Ceará/Brazil: Hazards and Management. *Journal of Coastal Research*, Itajaí, 39: 848-851.
- Ponçano W. L. 1986. Sobre a interpretação ambiental de parâmetros estatísticos granulométricos: exemplo de sedimentos quaternários da costa brasileira. *Revista Brasileira de Geociências*, 16 (2): 157-170.
- Raudkivi A. J. 1990. Loose boundary hydraulics. 3<sup>a</sup> ed. Ed. Pergamon – UK.
- Reineck H-E. & Singh, I. B. 1980. *Depositional Sedimentary Environments*. 2. ed. New, Springer-Verlag. 543 p.
- Sedrati M. & Anthony E. J. 2007. Storm-generated morphological change and longshore sand transport in the intertidal zone of a multi-barred macrotidal beach. *Marine Geology*, 244: 209–229.

- Silva Filho W. F. 2004. *Domínios Morfoestruturais da Plataforma Continental Do Estado Do Ceará*. Orientador: Iran Carlos Stalliviere Corrêa. Tese de Doutorado. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 288p.
- Yoshikawa S. & Nemoto, K. 2010. Seasonal variations of sediment transport to a canyon and coastal erosion along the Shimizu coast, Suruga Bay, Japan. *Marine Geology*, 271: 165-176. doi:10.1016/j.margeo.2010.02.010
- Trenhaile, A. S. 1997. *Coastal Dynamics and Landforms*, Oxford: Oxford University Press. 382p.
- Wright L. D., Guza R. T. & Short A. D. 1982. *Dynamics of a high-energy dissipative surf zone*. Marine Geology, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam 45: 41-62.
- Wright L. D. & Short A. D. 1984. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A synthesis. *Marine Geology*, 56: 93-118.

## **5 APLICAÇÃO DE ZONEAMENTO GEOAMBIENTAL NA PLANÍCIE COSTEIRA DE ALMOFALA, NW DO CEARÁ (BRASIL)**

### **Application to Geoambiental Zonning on the Almofal Coastal Plain, NW of Ceara (Brazil)**

#### **Resumo**

O zoneamento geoambiental na planície costeira de Almofala foi realizado como subsídeo ao gerenciamento costeiro. A área inclui as praias de Almofala, da Barreira e de Torrões (NW do Ceará, Nordeste do Brasil), influenciadas por altas temperaturas ( $>25^{\circ}\text{C}$ ), pluviometria média de 1172,21 mm, velocidade média dos ventos de 5,5 m/s, regime de meso-marés (1,48 m), e altura das ondas de 0,56 m. Os objetivos foram: (1) analisar as formas de uso e ocupação da Planície Costeira de Almofala; (2) analisar a vulnerabilidade das praias aos riscos ambientais, e morfologia da PCA; (3) zonedar as áreas de acordo com estabilidade dos ambientes com o uso e ocupação da PCA. A metodologia consistiu na: (1) aquisição de dados cartográficos, fotografias aéreas e imagens de satélite; (2) mapeamento morfológico; (3) mapeamento das áreas vulneráveis aos riscos ambientais utilizando fotografias aéreas (1958/1988), imagens Quickbird (2004) e Landsat (1977/2010); (4) mapeamento geoambiental, de acordo com capacidade de suporte dos sistemas aos usos, com integração de dados (de sensores remotos, mapa morfológico e da vulnerabilidade) em ambiente de Sistema de Informação Geográfica, na escala de 1:50.000. Os resultados permitiram identificar: APP's com maior área (22891591 m<sup>2</sup>); áreas adequadas a ocupação (8031957 m<sup>2</sup>); áreas de risco (3241413 m<sup>2</sup>); e áreas degradadas (19699 m<sup>2</sup>) por processos naturais (erosão costeira) e antrópicos.

**Palavras-chaves:** PCA, Ceará, zoneamento geoambiental, banco de dados

#### **Abstract**

The geoambiental zoning to Almofala coastal planning was be of assistance coastal management. This area include Almofala, Barreira and Torroes Beachs (NW of Ceara, Northeast Brazil), conditioned for high temperatures ( $>25^{\circ}\text{C}$ ), media raining 1172,21 mm, media velocity winds 5,5 m/s, mesotidal coast (1,48 m), and height waves to 0,56 m. The objective was: (1) analysis by use and occupation to PCA; (2) analysis the vulnerability to beaches by environmental risks and morphologic analysis to PCA. The methodology consisted: (1) collection of cartographic data, photography's aerial, Quickbird images and Landsat images; (2) morphologic mapping; (3) mapping of vulnerability areas by environmental risks,

using photography's aerial (1958/1988) Quickbird (2004) images and Landsat images (1977/2010); (4) geoambiental mapping according environment support capacity, with data integration (remote sensing, geomorphologic and vulnerability maps) in Geographic Information System, in scale 1:50000. The geoambiental map can identify: major APP's areas (22891591 m<sup>2</sup>); appropriate occupation areas (8031957 m<sup>2</sup>); risky areas (3241413 m<sup>2</sup>); and degraded areas (19699 m<sup>2</sup>) for natural process (coastal erosion) and anthropic process.

**Key-words:** PCA, Ceara, geoambiental zoning, database

## 5.1 INTRODUÇÃO

A planície costeira de Almofala (PCA) está sujeita a processos (amplitudes e correntes de marés, ondas e correntes longitudinais) que configuram à costa sob forma de progradação e retrogradação. É uma área de grandes belezas cênicas, a qual o turismo vem se inserindo lentamente, assim como o aumento da população, fazendo-se relevante o zoneamento geoambiental da área para o gerenciamento costeiro.

A ocupação desordenada e o uso irracional dos recursos naturais têm alterado ecossistemas costeiros, com o aumento da urbanização, desmatamento e carcinocultura, gerando níveis elevados de degradação ambiental (Kumar *et al.* 2010, Aguiar 2005).

A atuação de processos naturais (erosão, progradação) e antrópicos (ocupação humana, e fazenda de camarões) influenciam nas transformações nas planícies costeiras, responsáveis por crescimento ou diminuição de manguezais, desenvolvimento de cordões e bancos arenosos, recuo de falésias, migração de desembocaduras de canais de maré, degradação ambiental, etc. (Aguiar 2005, Araújo & Freire 2007).

A adequação das áreas para o uso e ocupação tem sido estudada por diversos autores: gestão integrada costeira e oceânica (Cicin-Sain & Knecht 1998); a experiência do gerenciamento costeiro em São Paulo (Filet 1994); zoneamento geoambiental de Irauçuba (Brandão 2003); mapeamento da sensibilidade ambiental e modelagem da vulnerabilidade ao longo da linha de costa de São Paulo (Carmona *et al.* 2004); diagnóstico preliminar da cartografia geotécnica e geoambiental no Brasil (Tominaga *et al.* 2004); Programa Zoneamento Ecológico-Econômico e Subprograma de Políticas de Recursos Naturais (MMA 2006); sensoriamento remoto na predição e determinação de impactos extremos na costa (Klemas 2009); importância das mudanças costeiras na determinação da vulnerabilidade de variações no nível do mar e de lagunas (Pendleton *et al.* 2010); avaliação da vulnerabilidade

costeira para o estado de Orissa, costa leste da Índia (Kumar *et al.* 2010); técnicas de sensoriamento remoto para o estudo de ecossistemas costeiros (Klemas 2011).

No estado do Ceará estudos sobre o gerenciamento costeiro foram realizados em trechos do litoral cearense: zoneamento geoambiental do estado do Ceará (Souza 1994); compartimentação territorial e gestão regional do Ceará (Lima *et al.* 2000); zoneamento geoambiental da Área de Proteção Ambiental de Canoa Quebrada, Aracati (Leal 2002); zona costeira do Ceará: diagnóstico para a gestão integrada (Aquasis 2003); zoneamento geoambiental no litoral leste do município de Beberibe (Aguiar 2005); mapeamento das unidades geoambientais da zona costeira do Ceará (Maia & Cavalcante 2005); utilização de geotecnologias: diagnóstico ambiental do estuário do Rio Acaraú (Araújo & Freire 2007); Zoneamento Ecológico-Econômico da Zona Costeira do Estado do Ceará (Silva *et al.* 2007); Programa Estadual de Gerenciamento Costeiro (SEMACE 2010).

O uso de integração de dados (morfológicos e uso e ocupação) e imagens de sensores remotos (Quickbird e Landsat) em Sistemas de Informações Geográficas (SIG's) é bastante útil em trabalhos ambientais, de evolução da linha de costa, análise da vulnerabilidade aos riscos ambientais na zona costeira (Barale & Folving 1996, Carmona *et al.* 2004, Chen *et al.* 2005, Callaghan *et al.* 2009, Kumar *et al.* 2010).

Esta pesquisa incluiu a integração de dados (rede, temático, cadastral, e imagem) em SIG's, e o sensoriamento remoto (interpretação visual de imagens e processamento digital de imagens - PDI's), nos mapeamentos temáticos (mapa geomorfológico e vulnerabilidade da linha de costa aos riscos ambientais) para a realização do zoneamento geoambiental da PCA.

Os objetivos foram: (1) analisar as formas de ocupação na planície costeira de Almofala; (2) analisar a morfologia da PCA e a vulnerabilidade da linha de costa aos riscos ambientais nas praias de Almofala, da Barreira e de Torrões; (3) zonar as áreas de acordo com a capacidade de suporte dos ambientes, com adequação de áreas pelas formas de uso e ocupação, contribuindo com o planejamento ambiental e gerenciamento costeiro da área.

### **5.1.1 Localização e caracterização geográfica da área de estudo**

A PCA (Figura 1) inclui as praias de Almofala, da Barreira e de Torrões, com 8km, dos 32 km de costa do município de Itarema, localizada na costa oeste do estado do Ceará (Nordeste, Brasil), enquadra-se nas coordenadas UTM: X1: 403000 E, 9673000N, X2: 412000E, 9679000N. Limita-se ao sul com o distrito de Carvoeiro, ao norte e nordeste com o

Oceano Atlântico, sudeste com o distrito de Camboré, e a oeste com a praia da Barra, distando 185 Km de Fortaleza, e o acesso se dá partindo da capital, à noroeste, pela CE – 085.

Na PCA, afloram duas unidades: a Formação Barreiras (Plioceno/Pleistoceno); e os Depósitos Quaternários (Holoceno). A área está assentada numa margem passiva, com uma falha inferida (NE-SW) no continente, e falhas normais (E-W) na plataforma continental interna (Beltrami *et al.* 1994). O arranjo geomorfológico da PCA inclui duas grandes unidades: o Planalto Costeiro, conhecido como Tabuleiro Pré-litorâneo, caracterizado por feições tabulares recortadas por interflúvios; a Planície Costeira com planícies aluviais, planície estuarina e a planície arenosa (Souza 1994, Lima *et al.* 2000).

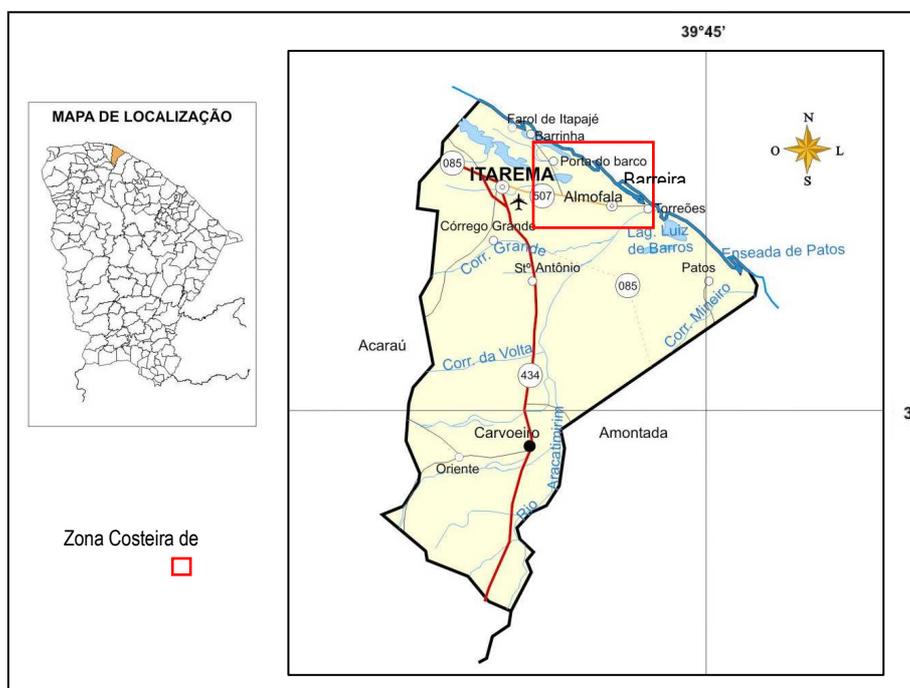


Figura 01. Mapa de localização da Planície Costeira de Almofala (quadro vermelho).

O clima na PCA é tropical chuvoso e quente, segundo classificação de Ayoade (1986), com temperaturas quentes que excedem 25°C, médias pluviométricas entre 800 mm à 1600 mm, e circulação leste (alísios). Os ventos têm velocidade média de 5,5 m/s, e direção preferencial de E (leste). As condições oceanográficas são de regime de meso-marés (1,48 m), com ondas de 0,56 m de altura.

A sub-bacia da PCA insere-se na Bacia Hidrográfica Litorânea do estado do Ceará. O rio Aracatimirim deságua na Praia de Torrões, com padrão drendrítico e paralelo. O Lagamar do Sargento é o maior corpo d'água na área estudada, e possui córregos como o do Lamarão e o do Pana, com nascentes no Tabuleiro Costeiro (Formação Barreiras) e nos Depósitos

Quaternários. A vegetação divide-se em: a mata ciliar, nas áreas de inundação; a mata de tabuleiro no planalto costeiro; a vegetação das dunas e das planícies arenosas; e o manguezal recobre as planícies estuarinas.

## 5.2 METODOLOGIA

A metodologia constou de pesquisa e avaliação bibliográfica da área de estudo, de uma avaliação histórica com ênfase a morfologia da PCA, e estudos da vulnerabilidade da linha de costa aos riscos ambientais.

Foram adquiridos documentos cartográficos da área: fotografias aéreas dos anos de 1958 e 1988; imagens de satélite Quickbird (2004); e imagens do satélite Landsat (1977, 1983, 1988, 2003 e 2010).

Duas campanhas de campo foram realizadas na PCA para o mapeamento das unidades geomorfológicas: (1) 10 a 15/02/2007 - coleta de pontos e perfis topográficos com DGPS, reconhecimento de áreas, identificação de unidades e subunidades geomorfológicas, e definição das zonas geoambientais; (2) 24 e 25/09/2010 - correção de dados do mapa geoambiental em campo.

### 5.2.1 Taxa de variação da linha de costa da PCA

As mudanças na linha de costa das praias de Almofala, da Barreira e de Torrões foi analisada: (1) por fotografias aéreas dos anos de 1958 e 1988 e imagens de satélite Quickbird (2004) utilizando geoindicadores ambientais (escarpas de praia e plataformas de abrasão); (2) imagens do satélite Landsat por digitalização da linha de maré alta (LMA) dos anos de 1977, 1983, 1988, 2003 e 2010.

A vulnerabilidade aos riscos ambientais das praias na PCA foi mapeada para os diferentes pontos de acordo com os processos costeiros resultantes da mobilidade dos sedimentos, tendo vulnerabilidades de acordo com Kumar *et al.* (2010): alta, sujeitos à elevadas taxas de erosão ( $< -10$  m); média, transição entre acreção e baixa a média erosão ( $< 0$  e  $> -10$  m); e baixa, sujeitos a acreção ( $> 0$ ).

Os mapas temáticos (geomorfológico e das mudanças na linha de costa) foram feitos através de interpretação visual de imagens Quickbird, e imagens Landsat, com PDI's realizados no aplicativo Easi space (PCI 9.1), integrados e transferidos para o ArcView 9.0, onde foi feita a digitalização da linha de costa e da LMA.

### 5.2.2 Mapeamento das Unidades Geoambientais

Levando-se em consideração a tipologia fisionômica dos geossistemas e dinâmica da paisagem, foi feito o zoneamento geoambiental da área, identificando as unidades, considerando os componentes ambientais da área, e sua evolução, através de todos os aspectos da paisagem.

Através de informações de geologia/geomorfologia, solo, vegetação, hidrologia, e uso e ocupação obtidas através de interpretação visual de imagens Quickbird, e imagens Landsat, com PDI's realizados no aplicativo Easi space (PCI 9.1). Os mapas temáticos (geomorfológico e das mudanças na linha de costa) foram gerados e integrados para a produção do mapa geoambiental da PCA (Figura 7) ArcView 9.0., pois permitiu realizar os processos de sobreposição de mapas, transparência, intersecção, e interpolação de dados, e ainda a quantificação das unidades geoambientais.

## 5.2 USO E OCUPAÇÃO E ASPECTOS SÓCIO-AMBIENTAIS NA PCA

O município de Itarema possui uma área de 720,66 km<sup>2</sup>, com 25 km de litoral, e 3 distritos incluindo a sede de Itarema. A planície costeira de Almofala inclui o litoral desse distrito e áreas adjacentes (CENSO 2000-SEPLAG-IBGE 2010). A PCA apresenta belas paisagens e algumas áreas de preservação permanente (APP's) quais como as praias, as planícies estuarinas, as dunas, onde apenas a população representa apenas 1,10% da população total da zona costeira do estado do Ceará (IBGE 2010).

A economia do município de Itarema baseia-se na agro-pecuária com 26,99% da economia do município e 5,35% do estado, com culturas de cana-de-açúcar, côco-da-bahia, mandioca, milho e feijão, e na pecuária de bovinos, suínos e aves, a indústria com 37,90% do estado, se destacando os serviços com 46,82% e 56,70% do estado do Ceará. O turismo é uma atividade bastante recente na área (AQUASIS 2003).

Na PCA, foram aplicados alguns programas de gerenciamento em nível federal, como: o Programa Nacional de Gerenciamento Costeiro (GERCO) e gerenciamento costeiro integrado (AQUASIS 2003, SEMACE 2010).

As comunidades têm papel fundamental nesses programas de gerenciamento, de participação e a mobilização, que são elementos-chave, pois para que se concretize o compromisso de promover, em conjunto, o desenvolvimento sustentável de uma região.

O povoamento inicial do município de Itarema se deu por comunidades indígenas, tendo seu distrito criado em 1985, enquanto o distrito de Almofala foi criado em 1987 (MEIRELES, 2004). Foram-se instalando as comunidades pesqueiras no litoral, sendo as mais importantes: Almofala, a do Farol, Volta do Rio, da Barra, e Torrões.

O processo de ocupação contemporâneo na PCA se dá pelo fenômeno da “segunda residência”, altamente disseminado no entorno de capitais, chamadas de residências de veraneio, ocorre com intuito de lazer, dando à zona litorânea algum dinamismo, mesmo que menor que nas áreas urbanas, e participam da urbanização litorânea. O turismo é responsável pela intensificação dos usos da PCA nas últimas décadas (MMA 1996).

### 5.2.1 Carcinocultura

A carcinocultura é a atividade de cultura de camarão realizada em fazendas, com cultivo em viveiros (em tanques) (Meireles 2001, 2004). É uma atividade impactante negativamente, pois não gera boa distribuição de renda, e causa grandes desmatamentos. Essa atividade é relativamente recente, e vem crescendo a partir da troca do uso de salinas por tanques de camarões, aumentando o desmatamento de manguezal da PCA.

Na PCA, as fazendas de carcinocultura no manguezal da praia da Barreira, cultura feita em tanques (Figura 2), ocupam uma área de 19.699m<sup>2</sup>, equivalente a 0,06% da área total.



Figura 2. Tanques de carcinocultura no canal estuarino da praia da Barreira, Itarema.

### 5.2.2 Artesanato

O artesanato é uma das atividades primitivas das comunidades, onde se inclui a criação de renda, confecção de roupas, enfeites e artigos de beleza de casa. É uma atividade pouco intensa, devido à atividade do turismo, diferente de outras regiões litorâneas do Ceará, porém se concentra nas comunidades como Volta do Rio, da Barra e de Almofala.

### 5.2.3 Pesca

A pesca é uma atividade tradicionalmente realizada na zona costeira de Almofala. A pesca marinha (artesanal) é feita em jangadas, e as espécies pescadas são agulhinha, albacarora, ariacu, arraia, arabaiana, bagres, bejupirá, biquara, bonito, cações, camarão, camurupim, cangulo, carapitanga, cavala, cioba, dentão, dourado, garoupa, gaiúba, guarajuba, guaraximbora, lagosta, pargo, pescadas, polvo, sardinha, serra, serigado, vermelho, xareu, caicó, outros (IPECE, 2010).

A pesca artesanal é feita nas lagoas por pescadores das comunidades próximas a elas, como na Laguna Salgada e Lagamar do Sargento, as maiores da área de estudo. Tem-se ainda a pesca industrial, que vem gerando maior produção e concentração de renda, em detrimento da pesca artesanal, e causando maiores impactos negativos nas comunidades pesqueiras, e no ambiente marinho.

### 5.2.4 Turismo

O turismo vem crescendo lentamente na PCA, sob forma de Turismo Familiar, principalmente nas praias de Almofala e da Barreira, em função das belas praias, campos de dunas, denso coqueiral, núcleo de pescadores, ancoradouro de jangadas barras de rio, lagamares, manguezal, e práticas esportivas como o *Kindsurf*.

O aumento das segundas residências, naturais de regiões turísticas, dinamiza as atividades de comércio e artesanato das comunidades da PCA. No entanto, a infra-estrutura é escassa para o turismo.

### 5.2.5 Degradação ambiental na PCA

Na PCA, a ocupação antrópica e a degradação ambiental ocorrem nas áreas de dunas, praias de Almofala, da Barreira e de Torrrões, e em alguns trechos de manguezal, onde as transformações são pontuais, pouco interferindo na dinâmica natural na costa. As atividades mais impactantes, são: a urbanização (700 m<sup>2</sup>), o desmatamento (128.344 m<sup>2</sup>), e a carcinocultura (19.699 m<sup>2</sup>) (Figura 3).

Nas terras indígenas de Almofala, com mais de 20 ha, foi desmatada (manguezal e mata ciliar) uma área de 19.699 m<sup>2</sup> para instalar fazendas de camarão, extinguindo importante

fonte de alimento, manifestações étnicas tradicionais (pesca, mariscagem e caça) e lazer, causando danos socioambientais, econômicos e culturais (Meireles 2001, 2004).

A comporta controlada por proprietários, interfere na entrada das águas oceânicas na Laguna Salgada, que integra o Lagamar do Sargento, gerando impactos relacionados a falta de pescado para as comunidades, diminuição do volume da água nas lagoas, e a salinização de aquíferos das lagoas. Áreas com carcinocultura do Aracatimirim tiveram seus mananciais subterrâneos (cacimbas e poços artesanais) salinizados.

As dunas ocupam uma grande área (Figura 3). A migração de dunas é um problema na PCA, em 1879 as dunas móveis migraram cobrindo a aldeia de Tremembé e a Igreja de Nossa Senhora de Assunção. No século passado dunas recobriram a Igreja de Almofala e foi sendo descoberta naturalmente (Figura 4a, b, c, d e), e foi reconstituída na década de 90.

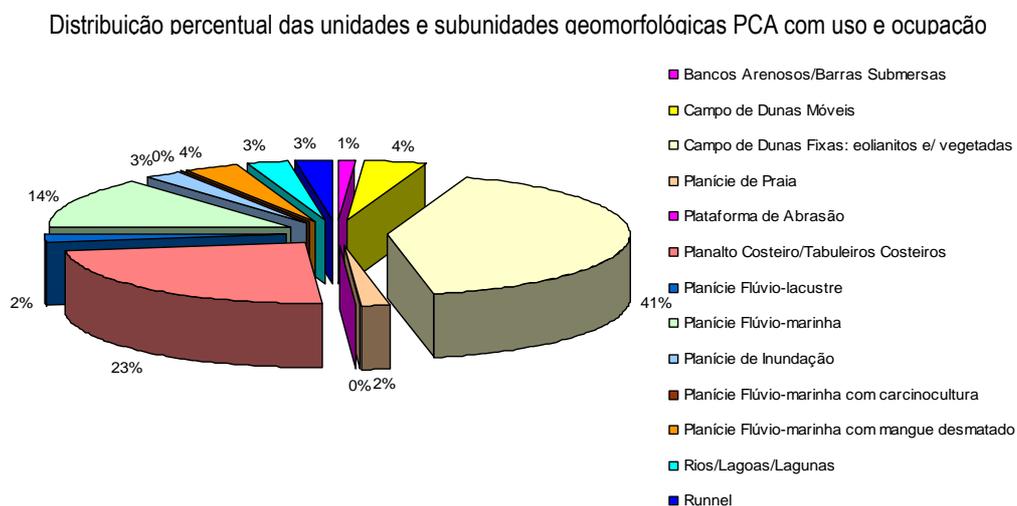


Figura 3. Distribuição percentual das unidades e subunidades geomorfológicas da PCA com uso e ocupação.



Figura 4. Evolução do campo de dunas que cobriu e descobriu a Igreja de Almofala no século passado: 1945 (a); 1959 (b); 1975 (c); 1994 (d); e 2007 (e).

Os problemas sociais incluem a descaracterização cultural das comunidades tradicionais, problemas de questões fundiárias, pesca proibida na laguna para as comunidades e uso dos recursos e atividades por populações próximas.

### 5.3 MORFOLOGIA, EROSÃO E ANÁLISE DE RISCOS AMBIENTAIS DA PLANÍCIE COSTEIRA DE ALMOFALA

#### 5.3.1 Morfologia da planície costeira de Almofala

O conhecimento da morfologia é essencial para o entendimento dos processos naturais que atuam nas zonas costeiras (França & Souza Filho 2003). A PCA possui uma área de 25.271.014 m<sup>2</sup> (Figura 5), e inclui: a planície aluvial (2,83%); a planície estuarina (21,89%) com planície flúvio-lagunar, planície de inter-maré, e delta; e a planície arenosa (48,53%) constituída por dunas fixas e eolianitos, dunas móveis, e praias e cordões litorâneos.

A PCA é resultante de acumulação de sedimentos, que ocorrem nas baixadas costeiras sob a influência dos processos de agradação marinhos por diversos agentes climáticos e hidrodinâmicos, e seus fatores, ventos, ondas, correntes e marés (Souza 1994).

Nas praias de Almofala, da Barreira e de Torrões o baixo gradiente topográfico e a amplitude de maré de 1,48 m (meso-maré) tornam a costa suscetível a inundações, à mobilidade sedimentar e aos processos erosivos gerados por correntes de maré e ondas. As praias dispõem-se em forma de sistema de barras (rigdes), e calhas (runnel) desde a linha de maré baixa até a base das dunas móveis, formadas por areia fina na zona de estirâncio (11,8%), e areia média (17,6%) na zona de pós-praia.

As praias de Almofala e de Torrões são constituídas por depósitos marinhos, recentes, contínuos, e na praia da Barreira (3 km), um cordão litorâneo no sentido NW, ocupa uma área de 81137.031 m<sup>2</sup> (2,51% da área total). Formam cristas arenosas que se estendem desde o nível da maré alta de sizígia, limitando-se com a base das dunas, até o nível da maré baixa de sizígia. As escarpas de praia incluem os terraços marinhos, as dunas móveis e os eolianitos, em contato com o solapamento marinho.

A velocidade de recuo da linha de costa (<-5 m/ano) (Klein *et al.* 2009), e a conseqüente retrogradação, criam “hot spots” ou zonas de erosão acentuadas na praia do Balneário de Piçarras. Neste sentido, pode-se classificar as zonas de média (<-5 m/ano) e alta vulnerabilidade (<-10 m) das praias da PCA como “hot spots”.

### 5.3.2 Erosão costeira e análise dos riscos ambientais da planície costeira de Almofala

A morfologia da PCA evidencia os processos naturais e desnudacionais diferenciados, associados e atuando na área, decorrentes do modelo evolutivo de eventos geológicos e paleoclimáticos, e atuais mudanças pela erosão, com conseqüente retrogradação da linha de costa, tornando todo o litoral suscetível aos riscos naturais.

A erosão observada no litoral de Itarema é notória, e vem comprometendo uma série de estruturas e equipamentos públicos e privados. A prefeitura implantou uma série de gabiões nas praias do Farol inadequados, que foram destruídos por ondas, acelerando a erosão em alguns locais (Farias & Maia 2010).

A exemplo de praias com alta vulnerabilidade aos riscos ambientais relacionados a erosão da linha de costa tem-se parte norte de Puri, central de Kendrapara, e sul de Bhadrak, na Índia (Kumar *et al.* 2010) com regime de meso-marés, e valores de recuo da linha de costa menores que -10 m/ano.

Na praia de Salvaterra (Ilha de Marajó), com regime de meso a macro-maré nota-se recuo da linha de costa, com 41 m/ano no período de 1995/1999 (França 2003), revelando altíssima vulnerabilidade aos riscos ambientais.

Na linha de costa da PCA, o recuo médio da linha de costa é de 13,15 m/ano, e perdendo -1,3 Km<sup>2</sup>/46 anos (1958/2004), revelando um avanço médio da linha de costa de 6,3 m/ano, e progradação de 888045,47 m<sup>2</sup>/46 anos.

Na PCA o recuo anual máximo da linha de costa foi de 20 m/ano (1958/1988), e de 14 m/ano (1988/2004). No entanto, a variação não se dá homogênea em toda a costa, com valores máximos de recuo anual de erosão de 25,22 m/ano na extrema costa oeste da praia da Barreira e na praia de Torrões (vulnerabilidade alta), e avanço da linha de costa de 6,5 m/ano na praia de Almofala (vulnerabilidade baixa) (Figura 5).

Na PCA (médio período) a LMA retrogradou -0,97 Km<sup>2</sup>/33anos (1977/2010). A progradação total foi de 0,37 Km<sup>2</sup>/33anos, entre 1988/2003.

O recuo da linha de costa na PCA foi de 13,7 m/ano (1977/1983), de 14,1 m/ano (1983/1988), de 8,3 m/ano (1988/2003), e de 12,1 m/ano (2003/2010), além de um avanço da linha de costa de 8,5 m/ano (1988/2003). Portanto, o aumento no recuo da linha de costa de 1977 a 1988, e de 2003 a 2010, com acresção ou estabilização entre 1988 a 2003.

Nas praias de Almofala e da Barreira, predominam média vulnerabilidade à erosão (Figura 5), sendo que na parte leste da praia de Almofala ocorre baixa vulnerabilidade (leve acresção).

As praias da PCA dominadas pelo clima e deriva litorânea de sentido NW, condicionaram a migração da linha de costa e das barras arenosas. Os impactos da erosão têm gerado diversos problemas como recuo da linha de costa, destruição de casas e construções, assoreamento de drenagem, e outros (Figura 6).

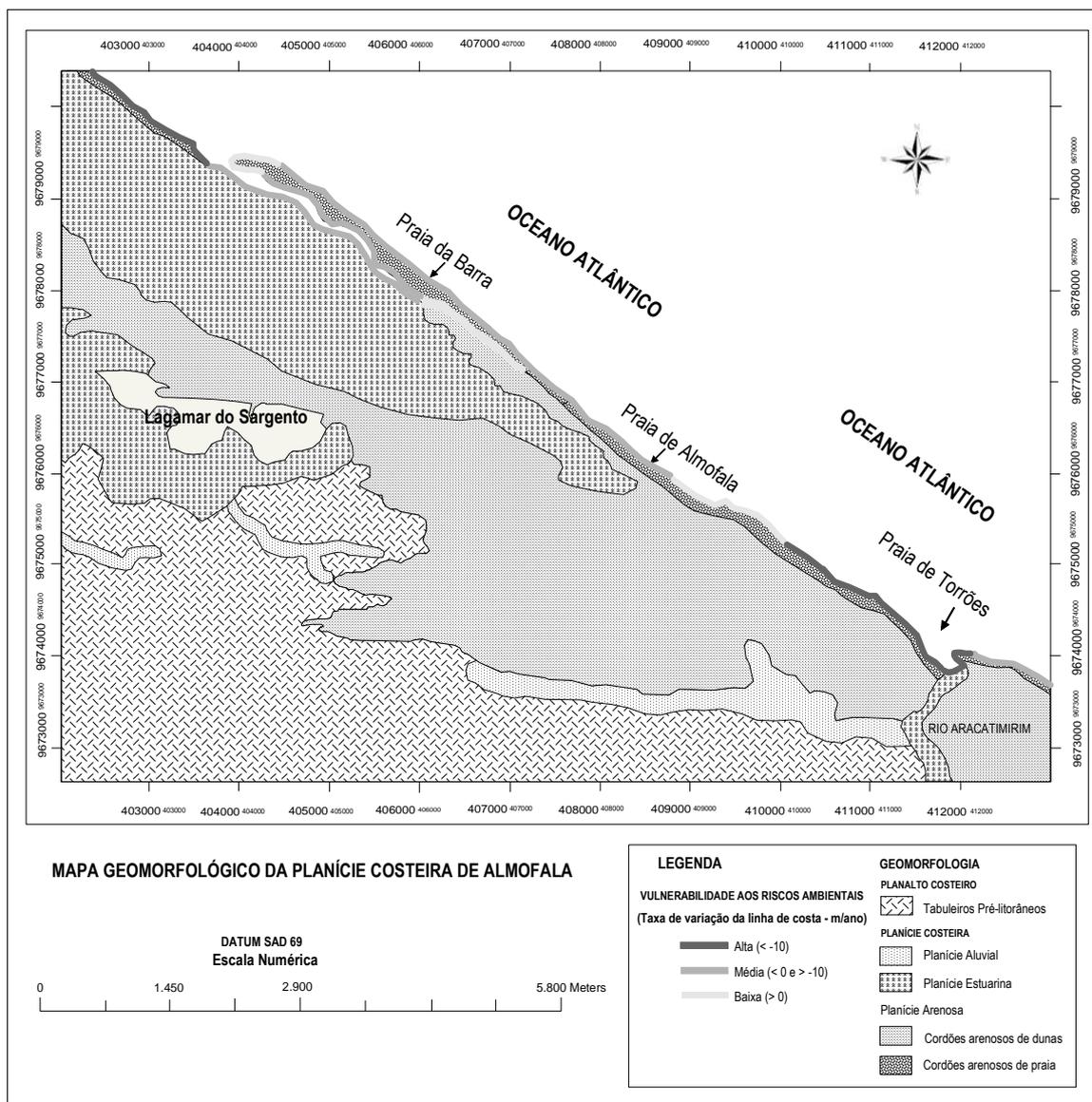


Figura 5. Mapa Geomorfológico com vulnerabilidade da linha de costa.

O cordão litorâneo da praia da Barreira sofreu significativa mudança, fazendo-o migrar para noroeste e ficar mais comprido. Essas mudanças levaram à processos como: fechamento de um canal de maré, mudando o fluxo de canais, afogamento e morte de vegetação de mangue, por deposição de sedimentos.



Figura 6. Inundação da maré de sizígia (março) e efeito da erosão na vila de Torrões (a) e (b); recuo da linha de costa na praia da Barreira (c); destruição da obra de contenção na em ponto na praia da Barreira (2007) nos meses de março (d), e novembro (e).

As praias da PCA em formas de cordões arenosos e sistemas de barras e calhas vêm sofrendo intensas transformações geradas por correntes, marés e ondas, com um recuo da linha de costa, característicos de praias retrogradacionais, com estágios transgressivos.

#### 5.4 ZONEAMENTO GEOAMBIENTAL DA PLANÍCIE COSTEIRA DE ALMOFALA

O zoneamento é uma técnica de gerenciamento muito empregada para dividir a zona costeiras em áreas de adequação ao uso e ocupação (Souza 1994, Cicin-Sain & Knecht 1998, Souza Filho 2000, Maia & Cavalcante 2005), de acordo com a ecodinâmica e unidades geossistêmicas (Bertrand 1969, Tricart 1977, Troppmair 1989), e os riscos naturais, vulnerabilidade ambiental (Carmona *et al.* 2004, Klemas 2009, Kumar *et al.* 2010, Pendleton *et al.* 2010).

A caracterização dos geossistemas e dos processos ecodinâmicos e níveis de vulnerabilidade das unidades morfológicas (Bertrand 1969, Tricart 1977, Troppmair 1989), foram realizadas a partir da análise dos aspectos físico ambientais da área, da dinâmica litorânea e constatação das energias que modelam a paisagem regional relacionando-os também com a utilização existente e planejada na área.

#### **5.4.1 Áreas de preservação permanente (APP's)**

As APP's são consideradas Reservas Ecológicas públicas ou particulares, e incluem todas as áreas de domínio flúvio-marinho, tais como restingas, manguezais, dunas e praias, com suas coberturas florestais e demais formas de vegetação natural segundo a Resolução n.º 004/85, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA/IBAMA 1992, Pinto 1996, SEMACE, 2010).

Na área de estudo, as APP's são representadas pelas unidades e subunidades geomorfológicas que compõem a PCA como: as planícies estuarinas recobertas por manguezais, cordões arenosos de dunas e praias atuais, numa área de 22891591 m<sup>2</sup> (Figura 7).

As APP's constituem ecossistemas em equilíbrio dinâmico, e devem ser destinadas à preservação, conservação, pesquisa científica, educação ambiental, manejo auto-sustentado, ecoturismo, pesca artesanal e ocupação humana intermitente ou de baixo efeito impactante (Filet 1994, Carmona *et. al.* 2004). São áreas sujeitas à erosão e à sedimentação geradas por ondas, correntes de maré e ventos, à inundação pelas marés ou pelas chuvas e à mobilidade sedimentar, características que conferem um caráter instável e inadequado à expansão urbana ou à instalação de obras de engenharia.

#### **5.4.2 Áreas adequadas à ocupação**

As áreas adequadas à ocupação incluem ecossistemas modificados, em função da estruturação e consolidação de assentamentos humanos, com rede viária definida e pavimentada, saneamento ambiental, serviços e comércios desenvolvidos. As metas ambientais devem incluir a Avaliação de Impacto Ambiental (AIA), a recuperação do patrimônio paisagístico, a recuperação da vegetação degradada, e da qualidade de vida urbana (Filet 1994, França & Souza Filho 2003).

Na PCA as AAO (Figura 7) constituem as superfícies de baixos platôs (planalto costeiro), com cotas topográficas acima de 15 m, sendo terrenos livres de inundações e da ação das ondas e correntes, com cerca de 8031957 m<sup>2</sup>, próprias à expansão urbana e agrícola.

#### **5.4.3 Áreas de risco à ocupação**

As áreas de risco à ocupação na PCA são representadas pelas áreas marginais dos recursos hídricos, incluindo: as planícies de rios, córregos, lagos, lagoas e estuários por

serem áreas instáveis e sujeitas a alagamentos periódicos, abrangendo 3241413 m<sup>2</sup> (Figura 7). As áreas já habitadas necessitam de definição de um plano de urbanização com as limitações do meio físico, o saneamento ambiental, a implantação de zonas de distância mínima de recuo da ocupação, a recuperação da vegetação, e redução da degradação.

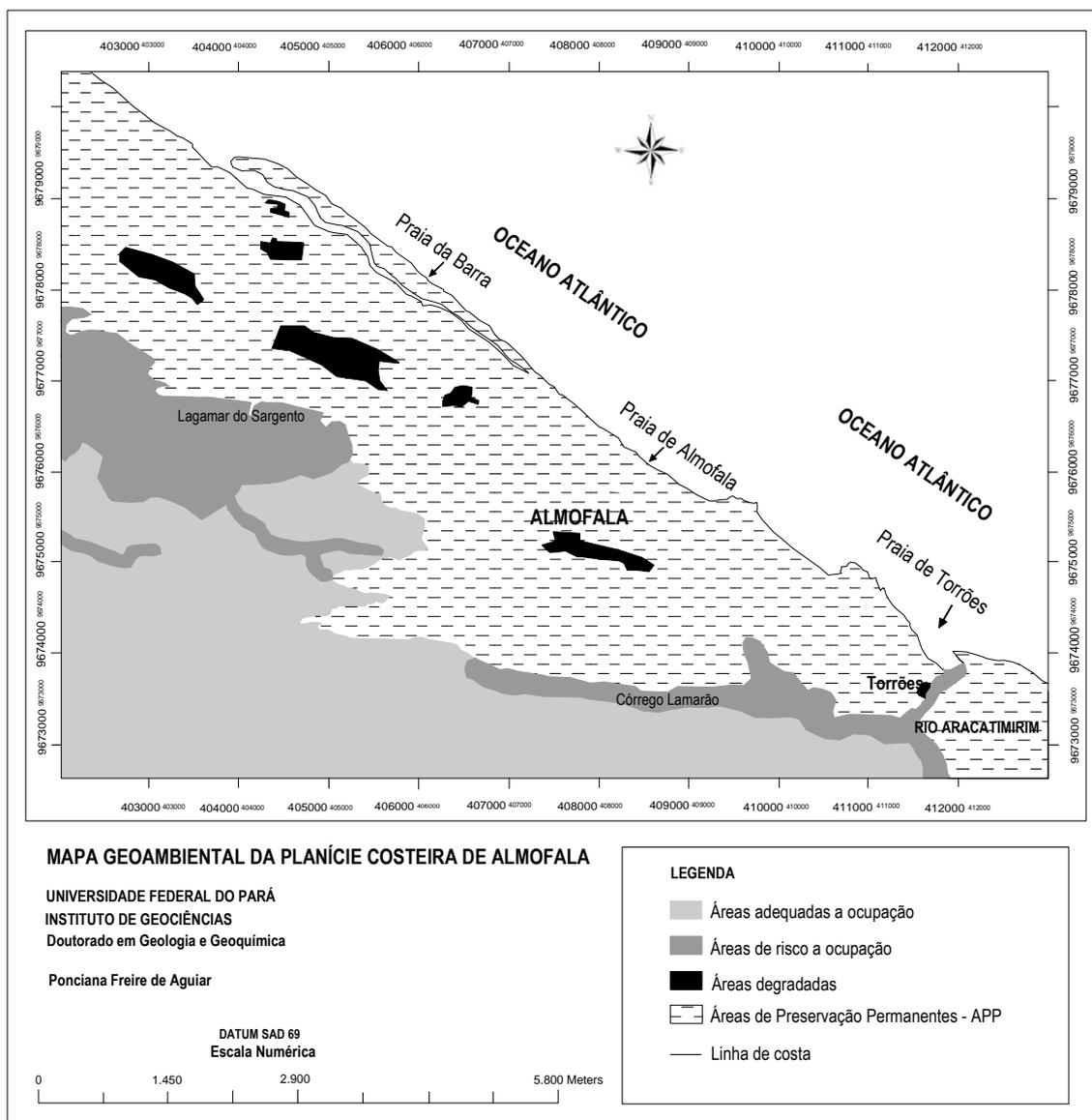


Figura 7. Mapa geoambiental da planície costeira de Almofala

#### 5.4.4 Áreas de degradação ambiental

As áreas degradadas da PCA incluem ecossistemas modificados e degradados como (Figura 7): áreas urbanas; e manguezais atravessados por estradas, desmatados, e/ou com tanques de carcinocultura, abrangendo uma área de 19699 m<sup>2</sup>. A alteração da cobertura vegetal nos manguezais expõe o substrato lamoso aos ventos, da radiação solar e chuvas,

submetendo-o a processos erosivos, a transformações pedogenéticas, geoquímicas e hídricas, além do desaparecimento da fauna.

A carcinocultura além do desmatamento polui os estuários por lançamento de resíduos que alteram a dinâmica sedimentar e introduzem elementos poluentes nas águas e no solo.

## 5.5 PROPOSTAS DE ORDENAMENTO TERRITORIAL E MEDIDAS MITIGADORAS

### 5.5.1 Ações Mitigadoras

Para a tomada de medidas mitigadoras é necessário um estudo detalhado dos seguintes aspectos para minimizar os problemas mais graves ao ambiente (Leal 2002, Brandão 2003). Algumas ações de monitoramento devem ser realizadas, propondo-se:

- Monitoramento dos processos costeiros e geração de banco dados de predição de impactos ambientais;
- Monitorar os processos dinâmicos (ondas, marés, ventos), para a quantificação dos fatores erosivos e migração de dunas, importante ferramenta de diagnóstico ambiental, para o manejo e gerenciamento costeiro;
- Monitorar as condições ambientais das lagoas costeiras, tendo por base a análise de diferentes variáveis abióticas (temperatura, pH, salinidade, alcalinidade e nutrientes) e variáveis bióticas (plâncton, macrófitas aquáticas e coliformes fecais);
- Priorizar a proteção dos manguezais, dunas costeiras e praias;
- Regenerar áreas costeiras já destruídas pela ação antrópica;
- Estabelecimento de uma linha de recuo (“*setback*”) para o uso e desenvolvimento de áreas costeiras (Souza Filho 2000);
- Determinação de uma zona entre a linha de maré baixa e a faixa de ocupação costeira, na qual a zona de praia pode crescer ou recuar naturalmente;
- Controle da emissão de efluentes domésticos, e da carcinocultura nos rios, estuários e oceano;
- Elaborar pesquisas que visem permitir a recuperação e a utilização racional dos ecossistemas aquáticos pelas regiões circunvizinhas e possíveis atividades primárias e secundárias;
- Para barrar os impactos negativos da privatização de APP’s na PCA, propõe-se que sejam realizados estudos para se criar uma Unidade de Conservação do tipo “Reserva Extrativista” na Laguna Salgada, incluindo o Lagamar do Sargento, permitindo a recuperação da laguna, eliminando a comporta, e permitindo o uso limitado apenas

para as comunidades nativas. A laguna tem elevado valor paisagístico, e será monitorada para evitar outros danos;

- Realizar atividades de educação ambiental nas comunidades e para turistas;
- Controle da erosão, com reflorestamento das margens dos recursos hídricos;
- Controle da extração de vegetal e mineral, com reflorestamentos;
- Realizar coleta adequada de lixo, com sistema de disposição de resíduos sólidos em aterros sanitários, etc.

## 5.6 DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

Diversos autores vêm realizando zoneamentos geoambientais no intuito de adequar as áreas de acordo com os usos e ocupação na zona costeira cearense, e minimizar os impactos causados por construções, carcinocultura, desmatamento, urbanização e degradação ambiental (Souza 1994, Leal 2002, Aguiar 2005, Maia & Cavalcante 2005, Araújo & Freire 2007, Silva *et al.* 2007). Na PCA os maiores impactos ambientais relacionam-se com a carcinocultura, e a ocupação nas praias que vêm sofrendo intensos processos erosivos.

A PCA representa uma zona predominantemente rural contendo áreas urbanas de densidade baixa, sendo Almofala um distrito, com algumas praias como a de Almofala, da Barreira, e de Torrões. São evidenciados conflitos por uso da Laguna Salgada a privatização da APP. A comunidade resiste, através de criação de associações e trabalhos com ONG's na área ambiental, no intuito de defender os recursos naturais de sua área.

Impactos ambientais antrópicos com destaque para a carcinocultura geram desmatamento e destruição de manguezais (APP), e poluição da drenagem. Criação de barragens e comportas na laguna provocam a salinização dos solos, e diminuição do nível de água, degradando a lagoa e o solo, necessitando de medidas mitigadoras urgentes.

Médias a altas taxas de erosão da linha de costa nas praias de Almofala, da Barreira e de Torrões, criam “hot spots” ou zonas de erosão acentuadas, com alta vulnerabilidade e riscos a erosão costeira, nas praias do Balneário de Piçarras com taxas de erosão maiores que 5m/ano (Klein *et al.* 2009).

Nas praias de Torrões e da Barreira predominam intensos processos de erosão, com recuo da linha de costa de com acreção na praia de Almofala, através de mudanças na morfologia. Os impactos da erosão têm gerado diversos problemas como recuo da linha de costa, destruição de casas e construções, assoreamento de drenagem.

A praia de Torrões possui alta vulnerabilidade de recuo da linha de costa (<-10 m/ano) aos riscos ambientais, como as praias na parte norte de Puri, central de Kendrapara, e sul de Bhadrak, na Índia (Kumar *et al.* 2010) com regime de meso-marés.

O sensoriamento remoto foi uma ferramenta muito útil e prática na integração de dados para análise e realização do mapa geoambiental, que mostrou que mais de 50% da PCA constitui uma APP, cerca de 8031957 m<sup>2</sup>, com processos ecodinâmicos de áreas instáveis, frágeis. A praia de Torrões apresenta vulnerabilidade alta a riscos de erosão da linha de costa, enquanto as praias de Almofala e da Barreira possuem de média a baixa vulnerabilidade.

No baixo curso do rio Acaraú ocorre degradação ambiental por desmatamentos, e poluição, que localmente, estão associados a extensas áreas de carcinocultura, a exemplo do estuário do Rio Acaraú (Araújo & Freire 2007). Os impactos ambientais relacionados a carcinocultura são: a redução da produção pesqueira artesanal, o desmatamento e degradação dos manguezais, a salinização dos solos.

Nesse contexto, propõe-se criar uma Unidade de Conservação do tipo ‘Reserva Extrativista’ na Laguna Salgada, contribuindo para a proteção da área, e disponibilização de uso para as comunidades nativas.

A tomada de medidas mitigadoras na PCA é emergencial, com: monitoramento e quantificação das mudanças morfológica constantes, dos processos hidrodinâmicos da área; manejo e descontaminação das águas; reflorestamento e combate ao desmatamento (SEMACE 2010); e criação da UC Reserva Extrativista na Laguna Salgada, seguindo os princípios de participatividade, sustentabilidade, ética e transparência, da Agenda 21.

## 5.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguiar P. F. 2005. *Zoneamento Geoambiental no Litoral Leste do município de Beberibe – CE*. Dissertação de Mestrado. Departamento de Geologia. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará. 157 p.
- Ayoade J. O. *Introdução a Climatologia para os Trópicos*. Tradução Maria Juraci Zami dos Santos, revisão Suely Bastos. Coordenação Editorial de Antônio Cristofoletti. 4ª edição. Rio de Janeiro, 1996. p. 224-264.
- ASSOCIAÇÃO DE PESQUISA E PRESERVAÇÃO DE ECOSISTEMAS AQUÁTICOS - AQUASIS. 2003. *A Zona Costeira do Ceará: Diagnóstico para a Gestão Integrada*. CAMPOS, A. A. *et. al.* (Coordenador). Fortaleza: AQUASIS, 2003, 293 p.

- Araújo M. V. & Freire, G. S. S. 2007. Utilização de Geotecnologias: Diagnóstico Ambiental do Estuário do Rio Acaraú, Ceará, Como Estudo de Caso. *Revista Pesquisas em Geociências*, 34 (2): 33-44. ISSN 1807 -9806
- Barale V. & Folving S. 1996. *Remote sensing of coastal interactions in the Mediterranean region*. *Ocean & Coastal Management*, 30 (2-3): 217-233.
- Beltrami C. V., Alves L. E. M., Feijó, F. J. 1994. Bacia do Ceará. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, Rio de Janeiro, 8 (1):117-126.
- Bertrand G. 1969. Paisagem e Geografia Física Global: Esboço Metodológico. In: *Caderno de Ciências da Terra* (13). São Paulo: USP, 1: 1-27.
- Brandão R. L. 2003. *Zoneamento Geoambiental da Região de Irauçuba - CE*. Texto Explicativo. Fortaleza: CPRM. 2003.
- Callaghan D., Ranasinghe R., Short A. 2009. Quantifying the storm erosion hazard for coastal planning. *Coastal Engineering*, 56: 90–93. DOI:10.1016/j.coastaleng.2008.10.003
- Carmona S. L., Gherardi D. F. M., Tessler M. G. 2004. Environmental sensitivity mapping and vulnerability modeling for oil spill response along the São Paulo State coastline. *Journal of Coastal Research*. Florida: Royal Palm Beach, 39: 1-10.
- Cicin-Sain B. & Knecht, R.W. 1998. *Integrated coastal and ocean management*. Concepts and practices. Washington-DC, Island Press. 517p.
- Chen S-S., Chen Liang-F., Liu Q-H., Li, X., Tan Q. 2005. *Remote sensing and GIS-based integrated analysis of coastal changes and their environmental impacts in Lingding Bay, Pearl River Estuary, South China*. *Ocean & Coastal Management*, South China. 48: 65-83.
- Filet M. 1994. A experiência do gerenciamento costeiro no Estado de São Paulo In: BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e da Amazônia Legal. *Treinamento operacional das equipes de gerenciamento costeiro dos Estados das Regiões Norte/Nordeste e Sul/Sudeste*. Brasília, (1): 63-71.
- França C. F. 2003. Morfologia e mudanças costeiras da margem leste da Ilha de Marajó (PA). Tese de Doutorado. Centro de Geociências. Universidade Federal do Pará. Belém: UFPA. 144 p.
- França, C. F. de F. & Souza Filho, P. W. M. 2003. *Análise das Mudanças Morfológicas Costeiras de Médio Período na Margem Leste da Ilha de Marajó, (Pa) em Imagem Landsat*. *Revista Brasileira de Geociências*. 33 (2): 127-136.
- INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE - IBAMA. 1992. *Resoluções CONAMA: Resolução n.º 004/85, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA)/IBAMA/MMA*.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. 2010. *Censo 2000*. (IBGE). [www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br). Acesso em: 15 Dez de 2010.

- INSTITUTO DE PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO E ECONÔMICO DO ESTADO DO CEARÁ - IPECE. 2010. *Perfil básico municipal de Itarema*. (IPECE). www.ipece.gov.br Acesso em: 15 de Dez 2010.
- Leal J. R. L. V. 2002. *Zoneamento Geoambiental da Área de Proteção Ambiental de Canoa Quebrada – Aracati – Ceará*, Fortaleza: UFC. Dissertação de Mestrado em Geologia Ambiental. 256 p.
- Lima C. L., Morais J. O. de., Souza M. J. N. 2000. *Compartimentação Territorial e Gestão Regional do Ceará*. Fortaleza: FUNECE, 268 p.
- Klein A. H. F., Araujo R. S., Polette M., Sperb R. M., Freitas D., Camargo J. M., Sprovieri, F. C.; Pinto F. T. 2009. *Ameliorative Strategies at Balneário Piçarras Beach – Brazil*. In: Williams, A.T. and Micallef, A. (ed). *Beach Management Guidelines: Principles and Practice*. Earthscan Publisher, London, UK. p. 241-255.
- Klemas V. V. 2009. The Role of Remote Sensing in Predicting and Determining Coastal Storm Impacts. *Journal of Coastal Research*, West Palm Beach, Florida. 25 (6): 1264–1275. DOI: 10.2112/08-1146.1
- Klemas V. 2011. Remote Sensing Techniques for Studying Coastal Ecosystems: An Overview. *Journal of Coastal Research*, West Palm Beach, Florida, 27 (1): 2–17. DOI: 10.2112/JCOASTRES-D-10-00103.1
- Kumar T. S., Mahendra R.S., Nayak S., Radhakrishnan K., Sahu K.C. 2010. Coastal Vulnerability Assessment for Orissa State, East Coast of Índia. *Journal of Coastal Research*, West Palm Beach, Florida. 26 (3): 523–534. DOI: 10.2112/09-1186.1
- Maia, L. P. & Cavalcante. 2005. Mapeamento das Unidades Geoambientais da Zona Costeira do Estado do Ceará. Programa Zoneamento Ecológico-Econômico da Zona Costeira do Estado do Ceará. Fortaleza: SOMA/SEMCE/LABOMAR. 226 p.
- Meireles A. J. 2001. *Morfologia litoral y sistema evolutivo de la costa de Ceará – Nordeste de Brasil* Universidad de Barcelona UB, España, Tesis Doctoral, 353 p.
- \_\_\_\_\_ 2004. Análise dos impactos ambientais originados pelas atividades de carcinocultura na área de influência direta da Comunidade Indígena Tremembé/Almofala – Itarema/CE. *Lauda Técnico*, 38 p.
- MMA (Ministério do Meio Ambiente). 2006. Programa Zoneamento Ecológico-Econômico e Subprograma de Políticas de Recursos Naturais: Subsídio ao Debate. Brasília, Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Políticas para o Desenvolvimento Sustentável. 51 p.
- Pendleton E. A., Thieler R., Williams S. J. 2010. Importance of Coastal Change Variables in Determining Vulnerability to Sea- and Lake-Level Change. *Journal of Coastal Research*, West Palm Beach, Florida. 26 (1): 176–183. DOI: 10.2112/08-1102.1.
- Pinto W. D. 1996. *Legislação Federal do Meio Ambiente*. Brasília, IBAMA, II : 1098-1108.

- SUPERINTENDÊNCIA ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE - SEMACE. 2010. GERCO-CE. 2010. *Programa Estadual de Gerenciamento Costeiro*. Fortaleza: SEMACE, 150 p.
- Silva L .A. C., Araujo R. C. P., Maia L. P., Cavalcate M. D. 2007. *Zoneamento Ecológico-Econômico da Zona Costeira do estado do Ceará*. XLV Congresso da Sober. Londrina. Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural. p. 1-20.
- Souza M. J. N. de. 1994. *Zoneamento Geoambiental do Estado do Ceará*. In: Ceará - Projeto Áridas: Grupo I - Recursos Naturais e Meio Ambiente. Fortaleza: Secretaria de Planejamento; Fundação Cearense de Meteorologia. 2: 183-206.
- Souza Filho P. W. M. 2000. *Avaliação e Aplicação de Sensores Remotos no Estudo de Ambientes Costeiros Tropicais Úmidos, Bragança, Norte do Brasil*. Tese de Doutorado. Centro de Geociências. Universidade Federal do Pará. Belém: UFPA. 2000. 236 p.
- Tominaga L. K., Pejon O. J, Bastos C. A. (Coordenadores). 2004. *Diagnóstico Preliminar da Cartografia Geotécnica e Geoambiental no Brasil*. São Carlos, São Paulo, 5º Simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica e Geoambiental. p. 1-20.

## 6 CONCLUSÕES

Na PCA afloram duas grandes unidades geológicas e geomorfológicas: a Formação Barreiras (constituídas de sedimentos argilo-arenosos do Neógeno) com Planalto Costeiro (tabuleiros litorâneos); e os Depósitos Quaternários (constituídos de depósitos aluviais, depósitos eólicos e depósitos marinhos do Holoceno) com Planície Costeira (planícies aluviais, planícies eólicas, planícies estuarinas e planícies arenosas).

O controle geológico influencia na dinâmica costeira das praias da PCA, associado às condições climáticas, configurando as características da área. A PCA possui um clima tropical chuvoso com média pluviométrica de 1195 mm, que é afetada por eventos extremos como EL niño e La niña. A vegetação da planície costeira é arbóreo-herbácea e o solo é arenoso. As praias estão sofrendo processos de erosão pela elevação do nível do mar, e baixa vazão dos rios nas quadras secas prolongadas, e a formação de barras características desses processos.

A Formação Barreiras do Neógeno originou-se da ação de processos de natureza continental, sendo retrabalhados por processos litorâneos, durante um nível de mar alto do Plioceno. Períodos de progradação das praias favoreceram a construção das barreiras, lagunas e flechas litorâneas. A presença de níveis conglomeráticos nessas camadas arenosas e argilo-arenosas resultou do retrabalhamento dos diversos depósitos por cursos d'água litorâneos.

A Morfologia da PAC apresentou maior destaque em certas feições através da geração do MNT: planalto costeiro com maiores altitudes, ultrapassando 30 m. Na planície costeira as feições de maior altitude são as dunas e eolianitos (>20 m). Também destacam-se as feições estuarinas, os rios e a Laguna do Sargento com as menores altitudes. As altitudes mais baixas são as praias, e a planície estuarina com cerca de 0,50 m. Das 34 amostras analisadas na PCA, predominou areia média (17,6%), na planície arenosa. Secundariamente destaca-se a areia fina (14,7%) nas dunas.

Assim, os dados de entrada (pontos cotados em campo com DGPS), e o uso da grade regular permitiram gerar MDT's da PCA e dar suporte a futuros estudos de predição de migração de dunas. O mapa de declividade permitiu uma análise de detalhes nas variações do relevo, sendo um bom procedimento metodológico em estudos geomorfológicos, aliados ao uso de sensores remotos no mapeamento e integração dos dados em SIG's, dando qualidade e precisão dos mapas finais. A aplicação de dados de DGPS na geração de MNT's resultou em bom procedimento metodológico em levantamentos geomorfológicos.

O mapeamento da compartimentação geomorfológica da PCA por integração de dados de sensores remoto, de altimetria, análise de sedimentos, em SIG é muito útil devido a maior

rapidez e menor custo. Contudo, os contatos com a realidade, em trabalhos de campo e laboratoriais, são fundamentais para a validação dos dados e modelos ambientais.

As mudanças morfológicas mais expressivas na PCA incluem: (1) o recuo da linha de costa nas praias de Torrões e da Barreira, com destruição de casas e barracas; (2) migração de dunas e soterramento de casas; e (3) carcinocultura com desmatamento e morte de manguezais.

Sugere-se a realização de estudos estratigráficos com furos, para realização de estudo de associação de fácies, e confecção da coluna estratigráfica, para amplo conhecimento da morfologia da PCA.

A formação das lagunas da PCA responde aos processos de erosão da Formação de Barreiras pelos córregos e rios no suprimento continental, e marinho pela desembocadura do rio Aracatimirim, ou do assoreamento causado pelo avanço de campos de dunas, fazendo com que o transporte pela deriva litorânea direcionado para NW, tenha barrado os canais de desembocaduras de pequenos córregos e canais de maré na parte oeste da linha de costa.

O estudo de médio período com imagens de alta resolução Quickbird integrado a fotografias aéreas mostrou a linha de costa da PCA com atuação de processos erosivos, mais bem notados no primeiro período/30anos (1958/1988), enquanto os processos progradacionais foram mais intensos no segundo período/16anos (1988/2004). As escarpas de praia e a plataforma de abrasão da PCA mostraram-se excelentes geoindicadores na delimitação e quantificação das variações da linha de costa, nas fotografias aéreas com bom nível de detalhes, e nas imagens Quickbird resultando em alto nível de detalhes.

Sugere-se a realização de futuros estudos de evolução com imagens de alta resolução de satélites Quickbird e/ou Ikonos, pois proporcionará uma evolução ainda mais detalhada da dinâmica da linha de costa na PCA.

O estudo de médio período com imagens Landsat mostrou que a linha de costa da PCA apresentou significativas mudanças, com predominância de erosão, nos primeiros períodos entre 1977/1982, e 1982/1988, e no último 2003/2010, e acreção de sedimentos no terceiro período de 1988/2003.

A taxa de erosão da PCA apresentou valores de 7,94 m/ano, e a de acreção apresentou 2,98 m/ano, com valores mais elevados no setor 2 com uma taxa de erosão de 8,53 m/ano, e de acreção de 3,16 m/ano.

O maior impacto erosivo ocorreu no primeiro período (1977/1983) com valores de retrogradação de -274751,58 m<sup>2</sup> (27,8%) do valor total de erosão 986205,43 m<sup>2</sup> (1977/2010).

Assim, áreas com taxas de erosão da linha de costa, maiores que 5 m/ano possuem alta vulnerabilidade e riscos, ocorrendo nas três praias da PCA. E as praias com altos valores de erosão (<-10 m) formam-se “hotspots”, como na Praia de Torrões e no extremo oeste da praia da Barreira.

O estudo dos aspectos meteorológicos e oceanográficos da PCA revelou que a área caracteriza-se por possuir valores mais altos de ventos na quadra seca que coincide com os mais baixos índices de precipitação da área. Os valores de velocidade e direção dos ventos condicionam a direção e intensidade das ondas, que direcionam-se em geral vindas de leste, e são mais intensas na quadra seca.

Neste contexto, a influência das ondas, juntamente com a corrente longitudinal direcionada para noroeste, impulsionam neste mesmo sentido, o transporte litorâneo de sedimentos na costa, que é de grande magnitude. O transporte eólico de sedimentos é mais intenso na quadra seca com valores de concentração em toda sua altura acumulando-se (95%) nos primeiros 10 cm, um peso de cerca de 4.0 gr do total.

O conhecimento desses parâmetros e fatores que influenciam na dinâmica costeira de Almofala é útil na obtenção de modelos morfodinâmicos das praias, bem como no entendimento das variações sazonais, sugerindo-se a realização destes estudos, para possíveis monitoramentos de erosão e acreção de sedimentos nas praias.

Assim, as praias são semi-expostas, com atuação de velocidade média dos ventos de 5,5 m/s e altura das ondas de 0,56 m. As três praias apresentaram RTR com onda dominante. O estudo da variabilidade morfosedimentar da PCA mostrou que a praia de Almofala teve parâmetro  $\Omega$  com estágios predominantes de terraço de maré baixa na praia, e nas praias da Barreira e de Torrões foram dissipativos, com sistema de barra e calha nas três praias.

O parâmetro  $\square$  resultou em sistema barra e calha longitudinal nas praias de Almofala e de Torrões, e estágio reflectivo na Barreira. Os processos comportaram-se com predomínio de erosão nas praias da Barreira (-64,5 m<sup>3</sup>) e de Torrões (-72,1 m<sup>3</sup>), e acreção (62,83 m<sup>3</sup>) na praia de Almofala (2007).

Assim, medidas paliativas emergenciais para conter a erosão, ou remoção de populações que margeiam a costa oeste de Almofala, e as praias da Barreira e de Torrões devem ser realizadas por parte dos órgãos competentes.

Na pesquisa de Zoneamento Geoambiental da PCA conclui-se que esta é uma zona predominantemente rural contendo áreas urbanas com densidade relativamente baixa, sendo Almofala um distrito, com algumas comunidades como a de Almofala, da Barreira, e a de Torrões. Existe uma tendência de expansão do turismo, por causa das suas belezas cênicas, e

atração de lazer e esportes, o que pode trazer impactos positivos como o desenvolvimento econômico, e impactos negativos como especulação imobiliária e destruição das paisagens.

Assim, são evidenciados os conflitos por uso da Laguna Salgada, com privatização da APP. A comunidade resiste, através de criação de associações e trabalhos com ONG's na área ambiental, no intuito de defender os recursos naturais. Nesse contexto, propõe-se criar uma Unidade de Conservação do tipo 'Reserva Extrativista' na área da Laguna Salgada, contribuindo para a proteção da área, e disponibilização de uso para comunidades nativas.

Impactos ambientais antrópicos com destaque para a carcinocultura geram desmatamento e destruição de manguezais (APP), e poluição da drenagem. As praias de Torrões e da Barreira predominam intensos processos de erosão, com acreção na praia de Almofala, através de mudanças na morfologia da própria dinâmica costeira. Os impactos da erosão têm gerado diversos problemas como destruição de casas e construções, assoreamento de drenagem. A criação de barragens e comportas na laguna gerou a salinização do solo, e diminuição do nível de água, degradando a lagoa e o solo, necessitando de medidas mitigadoras urgentes.

O sensoriamento remoto foi uma ferramenta muito útil e prática na integração de dados para análise e realização do mapa geoambiental, que mostrou que mais de 50% da PCA constitui uma APP, cerca de 8031957 m<sup>2</sup>, com processos ecodinâmicos de áreas instáveis, frágeis, e de nível de vulnerabilidade alta, altamente limitada para a ocupação humana, que vem sofrendo diversos crimes ambientais.

No rio Aracatimirim (Torrões), área de risco à ocupação por inundações, a redução da produção pesqueira artesanal, a descaracterização cultural das comunidades tradicionais, o desmatamento e degradação dos manguezais, a carcinocultura, degradam o rio e suas margens, problemas com questões fundiárias, também ocorrem nessa praia.

Portanto, a tomada de medidas mitigadoras na PCA é emergencial, com: estudos detalhados da área; monitoramento e quantificação das mudanças morfológicas da linha de costa constantes; monitoramento dos processos hidrodinâmicos da área; manejo e descontaminação das águas; reflorestamento e combate ao desmatamento; e criação da UC Reserva Extrativista na Laguna Salgada, seguindo os princípios de participatividade, sustentabilidade, ética e transparência, seguindo os princípios da Agenda 21.

## REFERÊNCIAS

- Aguiar P. F. 2005. *Zoneamento Geoambiental no Litoral Leste do município de Beberibe – CE*. Dissertação de Mestrado. Departamento de Geologia. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará. 157 p.
- Albuquerque M. G. & Pinheiro, L. S. 2005. *Estágios Morfodinâmicos e sua relação com os Riscos de banho de Mar na Praia do Futuro, Ceará*. II CBO (II Congresso Brasileiro De Oceanografia). Vitória – ES - Brasil. p. 1-3.
- Albuquerque M. da G., Calliari L. J., Corrêa I. C. S., Pinheiro L. de S. 2009. Morfodinâmica da Praia do Futuro, Fortaleza-CE: uma síntese de dois anos de estudo. *Quaternary and Environmental Geosciences*, 01 (2): 49-57.
- Araújo M. V. & Freire G. S. S. 2007. Utilização de Geotecnologias: Diagnóstico Ambiental do Estuário do Rio Acaraú, Ceará, Como Estudo de Caso. *Revista Pesquisas em Geociências*, 34 (2): 33-44. ISSN 1807 -9806
- Araújo R. S., Sprovieri F. C., Freitas D., Klein A. H. F. 2010. Variação da Morfologia Praial e Identificação de Zonas de Erosão Acentuada (ZEA) na enseada do Itapocorói SC. *Braz. J. Sci. Technol*, 14 (1): 29-38.
- ASSOCIAÇÃO DE PESQUISA E PRESERVAÇÃO DE ECOSISTEMAS AQUÁTICOS - AQUASIS. 2003. *A Zona Costeira do Ceará: Diagnóstico para a Gestão Integrada*. CAMPOS, A. A. et. al. (Coordenador) Fortaleza: AQUASIS. 293 p.
- Ayoade J. O. 1996. *Introdução a Climatologia para os Trópicos*. Tradução Maria Juraci Zami dos Santos, revisão Suely Bastos. Coordenação Editorial de Antônio Cristofolletti. 4ª edição. Rio de Janeiro, p. 224-264.
- Baba J. & Komar P.D. 1981. Measurements and analysis of settling velocities of natural quartz sand grains. *Journal of Sedimentary Petrology*, 51 (2): 631-640.
- Baptista P., Bastos L., Bernardes C., Taborda R. 2006. Morphodynamics of Exposed Sandy Beaches. *Journal of Coastal Research*, Special Issue, 39: 355-359.
- Barale V. & Folving S. 1996. Remote sensing of coastal interactions in the Mediterranean region. *Ocean & Coastal Management*, 30 (2-3): 217-233.
- Beltrami C. V., Alves L. E. M., Feijó F. J. 1994. *Bacia do Ceará*. Boletim de Geociências da Petrobrás, Rio de Janeiro, 8 (1): 117-126.
- Berger A. R. 1996. *The geoinicator concept and its application: an introduction*. In: R.B. Antony & J.I William J. Iams (ed.). *Geoindicators: assessing rapid environmental changes en earth systems*. Rotterdam, A. A. Balkema. p. 1-14.
- Bertrand G. 1969. Paisagem e Geografia Física Global: Esboço Metodológico. In: *Caderno de Ciências da Terra* (13). São Paulo: USP, p. 1-27.

- Bezerra A. F. & Furtado A. M. 1995. *Estudo das Variações Morfológicas e Sedimentológicas da Praia de Piratininga, como Subsídio para o Entendimento da Dinâmica Litorânea*. Instituto de Geociências. Universidade Federal Fluminense. <http://www.uff.br/egg/artigos/bezerra-adriana.doc>.
- Birkemeier W. A. 1981. *Fast accurate two-person beach survey*. *Coastal Engineering Technical Aid* 81-11. U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station. Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, Mississippi. 22p.
- Bittencourt A. C. S., Dominguez L. M., Reimão S. I. 2003. Uma Aproximação de Primeira Ordem entre o Clima de Ondas e a Localização, de Longa Duração, de Regiões de Acumulação Flúvio-Marinha e de Erosão na Costa Norte do Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*. 33 (22): 159-166.
- BRASIL. Projeto RADAMBRASIL. *Levantamento de recursos naturais - Fortaleza - Jaguaribe - Natal: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra*. v.21 e 23, Folhas SA. 24 e SB 24/25. Rio de Janeiro: Ministério das Minas e Energia. Secretaria Geral. 1981. 475 p.
- Brito J. L. N. S. & Filho, L. C. T. C. 2002a. *Fotogrametria Digital*. Instituto Militar de Engenharia. 100 p.
- Brito J. L. N. S. 2002b. *Assessment of the Precision of Digital Orthoimages*. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia. 50 p.
- Burrough P. A. & McDonnell R. A. 1998. *Principles of geographical information systems*. Oxford: Oxford University Press, 333 p.
- Caby R. & Arthaud M. H. 1986. Major precambrian nappes of the Brazilian Belt, Ceará, northeast Brazil. *Geology*, London, 14 (10): 871-874.
- Camara G. & Medeiros J. S. 2000. *Introdução à Ciência da Geoinformação*. São José dos Campos: INPE. 200 p.
- Calliari L. J., Guedes R. M. C., Pereira P. S., Lélis R. F., Antikeira J. A.; Figueiredo S. A. 2010. Perigos e riscos associados a processos costeiros no litoral sul do Brasil (rs): uma síntese. *Braz. J. Aquat. Sci. Technol.*, 14 (1): 49-61.
- Callaghan D., Ranasinghe R., Short A. 2009. Quantifying the storm erosion hazard for coastal planning. *Coastal Engineering*, 56: 90-93. DOI:10.1016/j.coastaleng. 2008.10.003
- Campos L. G. 1992. *Delineamento do pé do talude na margem continental do Ceará através da integração de dados geológicos e geofísicos*. Dissertação (Mestrado) Curso de Pós-Graduação em Geofísica, Universidade Federal do Pará, Belém, 129 p.
- Carmona S. L., Gherardi D. F. M., Tessler M. G. 2004. Environmental sensitivity mapping and vulnerability modeling for oil spill response along the São Paulo State coastline. *Journal of Coastal Research*. Florida: Royal Palm Beach, (39): 1-20.

- Carvalho A. M. 2003. *Dinâmica costeira entre Cumbuco e Matões, costa noroeste do Estado do Ceará*. Ênfase nos processos eólicos. 2003. Tese (Doutorado) – Curso de Pós-Graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador. 194 p.
- Castro D. L. 1990. *Interpretação quantitativa de anomalias gravimétricas ar-livre da margem continental norte brasileira, setor nordeste*. 109f. Dissertação (Mestrado) Curso de Pós-Graduação em Geofísica, Universidade Federal do Pará, Belém, 1990.
- Castro *et al.* 1998. Gravity map of part of northeast Brazil and adjacent continental margin and its interpretation based on the hipotesis of isostasy. *Revista Brasileira de Geofísica*, Rio de Janeiro, 16: 115-131.
- Castro D. L. & Costa F. C. N. 1999. Mapas gravimétricos do Estado do Ceará. *Revista de Geologia*, 12: 69-80.
- COSTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER - CERC. 1984. *Shore Protection Manual*. U.S.Army Corps of Engineers. Washigton: CERC, D.C V.I, 597p, V.II, 603 p.
- Cicin-Sain B. & Knecht R. W. 1998. *Integrated coastal and ocean management*. Concepts and practices. Washington-DC, Island Press. 517 p.
- Chavez P. S. Jr. 1988. *An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data: Remote Sensing of Environment*, 24: 459-479.
- Chen S.-S., Chen L.-F., Liu Q.-H., Li, X., Tan Q. 2005. Remote sensing and GIS-based integrated analysis of coastal changes and their environmental impacts in Lingding Bay, Pearl River Estuary, South China. *Ocean & Coastal Management*, South China. 48: 65-83.
- Chu Z. X., Sun X. G., Zhai S. K., Xu K. H. 2006. Changing pattern of accretion/erosion of the modern Yellow River (Huanghe) subaerial delta, China: Based on remote sensing images. *Marine Geology*, 227 (1/2): 13-30. DOI:10.1016/j.margeo.2005.11.013
- Cohen M. C. L. & Lara R. L. 2003. Temporal changes of mangrove vegetation boundaries in Amazônia: Application of GIS and remote sensing techniques. *Wetlands Ecology and Management*, 11: 223-231.
- Costa I. G. da C., Beltrami, C. V., Alves L. E. M. 1990. A evolução tectono-sedimentar e o habitat do óleo da Bacia do Ceará. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, Rio de Janeiro, 4 (1): 65-74.
- Costa N. B. de. 2001. *Estudo hidrogeológico de aquífero costeiro – sítio fleixeiras- área da grande região de São Pedro município de Paracuru-Ceará*. Relatório de graduação. UFC. Departamento de geologia. 100 p.
- CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS - CPTEC. 2010. *El niño e La niña*. [http://www.cptec.inpe.br/enos/Oque\\_el-nino.shtml](http://www.cptec.inpe.br/enos/Oque_el-nino.shtml). Acesso em: 08 de janeiro de 2008.

- CONSELHO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO CIENTÍFICO E TECNOLÓGICO - CNPQ. 2003. Projeto Nordeste - Definição e Quantificação dos Processos Costeiros no Litoral do estado do Ceará: Implicações para a Gestão Adequada da Zona Litorânea. Fortaleza: CNPQ. 307 p.
- SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - CPRM. 2003. *Atlas de geologia e Recursos minerais do Ceará: Sistemas de Informações Geográficas - SIG*. Mapas na escala 1:500.000. Brasil: CPRM, Fortaleza: CNPQ, ICD-Rom.
- Crowell M., Leatherman S. P., Buckley M. K. 1991. Historical shoreline change: error analysis and mapping accuracy. *Journal of Coastal Research*, 7: 839-852.
- Davis Jr. R. A. & Hayes M. O. 1984. What is a wave-dominated coast? *Marine Geology*, 60: 313-329.
- Davis R. 1992. *Depositional System: An Introduction to Sedimentology and Stratigraphy*. 2 ed. New Jersey: Prentice Hall. 604 p.
- DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO (DHN). 2006. *Dados Meteorológicos e Oceanográficos da carta 29 (do Quadrado de Marsden 303)*. Disponível em: <http://schemas.openxmlformats.org/package/2006/content-types>. Acesso em: 05 de janeiro 2008.
- DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO (DHN). 2007. Tábua das marés para o Porto de Belém. Disponível em: <http://www.mar.mil.br/dhn/chm/tabuas/index.htm> . Acesso em: 05 jan. 2007.
- Dolan R. B., Hayden B. P., May P. 1980. The reliability of shoreline change measurements from aerial photographs. *Shore and Beach*, 48: 22-29.
- Filet M. 1994. A experiência do gerenciamento costeiro no Estado de São Paulo In: BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e da Amazônia Legal. *Treinamento operacional das equipes de gerenciamento costeiro dos Estados das Regiões Norte/Nordeste e Sul/Sudeste*. Brasília, p. 63-71.
- El-Raey M., Abdel-Kader A. F., Nasr S. M., Gamily H. I. 1996. Remote sensing and GIS for an oil spill contingency plan, Ras-Mohammed, Egypt. *International Journal of Remote Sensing*, 17 (11): 2013-2026.
- Farias E. G. G. & Maia L. P. 2010. Uso de Técnicas de Geoprocessamento para a Análise da Evolução da Linha de Costa em Ambientes Litorâneos do Estado do Ceará, Brasil. UNIVALE. *Journal of Integrated Coastal Zone Management*. p. 1-23.
- Ferla M., Cordella M., Michielli L. A. 2007. Rusconi Long-term variations on sea level and tidal regime in the lagoon of Venice. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 75: 214-222.
- Fernandes A. 2000. *Fitogeografia Brasileira*. Fortaleza: Multigraf. 340 p.

- Florenzano T. G. 2002. *Imagens de satélite para estudos Ambientais*. São Paulo: Oficina de Textos, 97 p.
- Folk R. L. & Ward C. 1957. Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27 (1): 3-26.
- Forbes D. L. & Livernam D. G. E. 1996. *Geological indicators in the coastal zone*. In: BERGER, A. R. AND IAMS, W. J. (eds.) *Geoindicators: assessing rapid environmental changes in earth systems*. Rotterdam, Balkema. p. 175-192.
- Fonseca L. M. G., Mascarenhas N. D. A. *Método para restauração e reamostragem de imagens do sensor TM*. São José dos Campos: INPE.1988. (INPE-4491-PRE/1255). 15 p.
- Fonseca L. M. G., Prasad G. S. S. D., Mascarenhas N. D. A. 1993. Combined interpolation – restoration of Landsat images through FIR filter techniques. *International Journal of Remote Sensing*, 14 (13): 2547-2561.
- França C. F. 2003. Morfologia e mudanças costeiras da margem leste da Ilha de Marajó (PA). Tese de Doutorado. Centro de Geociências. Universidade Federal do Pará. Belém: UFPA. 144 p.
- Freire G. S. S. 1985. *Geologia marinha da plataforma continental do Ceará*. Dissertação (Mestrado) - Centro de Tecnologia, Departamento de Geologia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 1985. 132 p.
- Freire G. S. S. 1989. *Edute hydrologique et sedimentologique de l'estuarie du rio Pacoti (Fortaleza, Ceará, Brasil)*. Nantes: Université de Nantes Faculte dès Sciences et dès Techniques. (These du Doctorat). 300 p.
- Freire G. S. S., Cavalcanti V. M. M. 1998. *Cobertura sedimentar quaternária da plataforma continental do Estado do Ceará*. Fortaleza: DNPM/LGMA-UFC, 42 p.
- Freire G. S. S. & Morais J. O. 2003. *Plataforma Continental do Ceará*. In: A Zona Costeira do Ceará: Diagnóstico para a Gestão Integrada. Coordenadores Alberto Alves Campos et al Fortaleza: AQUASIS, p. 40 – 42, 293 p.
- FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSO HÍDRICOS - FUNCEME. 2008. *Meteorologia e Oceanografia do estado do Ceará*. Fortaleza: FUNCEME. 2008. <http://www.funceme.br/DEMET/index.htm>. Acessado em: 31 dezembro de 2008.
- FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS - FUNCEME. 2010. *El Niño e La Niña; Boletins Meteorológicos*. In: Meteorologia e Oceanografia. Fortaleza: FUNCEME. <http://www.funceme.br/DEMET/index.htm>. Acessado em: 31 de dezembro de 2010.
- Héquette A., Hemdane Y., Anthony E. J. 2008. Sediment transport under wave and current combined flows on a tide-dominated shoreface, northern coast of France. *Marine Geology*. 249: 226–242.

- Gibbs R. T., Mathew M. D., Link D. A. 1971. The relationship between size and sorting velocity. *Journal of Sedimentary Petrology*, 41: 07-18.
- Goovaerts P. A. 2000. Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. *Journal of Hydrology*, 228 (1-2): 113-129.
- Guza R. T. & Inman D. L. 1975. Edge waves and beach cusps. *Journal of Geophysical Research*, 80 (21): 2997-3012.
- INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE - IBAMA. 1992. *Resoluções CONAMA: Resolução n.º 004/85, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA)/IBAMA/MMA.*
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. 2009. *Manual Técnico de Geomorfologia*. ISBN 978-85-240-4110-5. 2ed. Rio de Janeiro: Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais do IBGE. (Manuais técnicos em geociências, ISSN 0103-9598, n. 5. 188 p.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. 2010 *Censo 2000*. (IBGE). [www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br). Acesso em: 15 Dez de 2010.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS/ DIVISÃO DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS. INPE-DPI. 2002. *Spring 3.6.03: [Ajuda]*. São José dos Campos: DPI/INPE, 2002.
- INSTITUTO DE PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO E ECONÔMICO DO ESTADO DO CEARÁ - IPECE. 2010. *Perfil básico municipal de Itarema*. (IPECE). [www.ipece.gov.br](http://www.ipece.gov.br) Acesso em: 15 de Dez 2010.
- Jensen J. R., Ramsey E. W., Holmes J. M., Michel J. E., Savitsky B., Davis B. A. 1990. Environmental sensitivity index (ESI) mapping for oil spills using remote sensing and geographic information system technology. *International Journal of Geographical Information Systems*, 4 (2): 181-201.
- Jensen J. R., Narumalani S., Weatherbee O., Murday M., Sexton W. J., Green C. J. 1993. Coastal environmental sensitivity mapping for oil spills in the United Arab Emirates using remote sensing and GIS technology. *Geocarto International*, 2: 5-13.
- Jensen J. J.; Halls J. N., Michel J. 1998. A systems approach to environmental sensitivity index (ESI) mapping for oil contingency planning and response. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 64 (10): 1003-1014.
- Jackson D. W. T. T., Cooper J. A. G., Rio L. del. 2005. Geological control of beach morphodynamic state. *Marine Geology*. (216): 297–314.
- Johnson R. A. & Wichern D. W. 1998. *Applied Multivariate Statistical Analysis*. New Jersey, Prentice Hall, 4a ed., 816 p.

- Klein R. J. T., Nicholls R. J., Ragoonaden S., Capobianco M., Astoni J., Buclde E. N. 2001. *Technological Options for Adaptation to Climate Change in coasta Zones. Journal of Coastal Research*. Florida: Summer. 3: 531-543.
- Klein A. H. F., Benedet Filh, L., Hsu J. R. C. 2003. Stability of headland bay beaches in Santa Catarina: a case study. In: Klein, A.H.F., Finkl, C.W., Rörig, L.R., Santana, G.G., Diehl, F.L. and Calliari, L.J. (eds), *Journal of Coastal Research*, Special Issue 35, Proceedings of the Brazilian Symposium on Sandy Beaches: Morphodynamics, Ecology, Uses, Hazards and Management, p. 151-166.
- Komar P. D. 1983. *Beach processes and erosion - An Introduction*. In: KOMAR PD (Ed.) *Handbook of Coastal Processes and Erosion*. Florida: CRC Press, p. 1-20.
- Leal J. R. L. V. 2002. *Zoneamento Geoambiental da Área de Proteção Ambiental de Canoa Quebrada – Aracati – Ceará*, Fortaleza: UFC. Dissertacao de Mestrado em Geologia Ambiental. 256 p.
- Lima, C. L., Morais J. O. de., Souza M. J. N. 2000. *Compartimentação Territorial e Gestão Regional do Ceará*. Fortaleza: FUNECE, 268 p.
- Li R., Deshpande S., Niu X., Lee I-C., Wu B. 2008. Multi-dimensional geospatial data integration for coastal change analysis. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Beijing. XXXVII. (8): 1311-1316.
- McNinch J. E. 2004. Geologic control in the nearshore: shore-oblique sandbars and shoreline erosional hotspots, Mid-Atlantic Bight, USA. *Marine Geology*. 211 (1-2): 121-141.
- Maia L. P., Sabadia J. A. B., Freire G. S. S., Serra, J. 1997a. *Caracterização geoquímica e diagenética da cimentação carbonática dos beach rocks e eolianitos da região costeira do Ceará*. In: Boletim XVII Simpósio de Geologia do Nordeste, Fortaleza-CE. p. 177-181.
- Maia L. P. 1998. *Processos costeiros y balance sedimentario a lo largo de Fortaleza (NE – BRASIL): Implicaciones para una gestión adecuada de la zona litoral*. Tese de Doutorado. Universidade de Barcelola, Barcelona-ES. 269 p.
- Maia L. P. & Cavalcante. 2005. *Mapeamento das Unidades Geoambientais da Zona Costeira do Estado do Ceará*. Programa Zoneamento Ecológico-Econômico da Zona Costeira do Estado do Ceará. Fortaleza: SOMA/SEMCE/LABOMAR. 226 p.
- Marengo J. A. 2006. On The Hydrological Cycle of the Amazon Basin: a Historical review and Current Statof-the-art. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 21 (3): 1-19.
- Marfai M. A. & Almohammad H. 2008. Coastal dynamic and shoreline mapping: multi-sources spatial data analysis in Semarang Indonesia. *Environ Monit Assess*. 142: 297–308. DOI 10.1007/s10661-007-9929-2
- Masselink G. & Short A. D. 1993. The effect of tide range on beach morphodynamics and morphology: a conceptual beach model. *Journal of Coastal Research*, 9 (3): 785-800.

- Masselink G., 1993. Simulating the effects of tides on beach morphodynamics. *Journal Coastal Research*, 15: 180-197.
- Millette T. L., Argow B. A., Marcano E., Hayward C., Hopkinson C. S., Valentine V. 2010. Salt Marsh Geomorphological Analyses via Integration of Multitemporal Multispectral Remote Sensing with LIDAR and GIS. *Journal of Coastal Research*. West Palm Beach, Florida. 26 (5): 809–816.
- Muehe D. 2001. Critérios Morfodinâmicos para o Estabelecimento de Limites da Orla Costeira para fins de Gerenciamento. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 2: 35-44.
- Masselink G., Kroon A., Davidson-Arnott R. G. D. 2006. Morphodynamics of intertidal bars in wave-dominated coastal settings — A review. *Geomorphology*, 73: 33–49  
www.sciencedirect.com
- Masselink G., Auger N., Russell P., O'hare T. 2007. Short-term morphological change and sediment dynamics in the intertidal zone of a macrotidal beach. *Sedimentology*, 54: 39–53. DOI: 10.1111/j.1365-3091.2006.00825.x
- Meireles A. J. 2001. *Morfologia litoral y sistema evolutivo de la costa de Ceará – Nordeste de Brasil*. Universidad de Barcelona UB, España, Tesis Doctoral, 353 p.
- \_\_\_\_\_ 2004. Análise dos impactos ambientais originados pelas atividades de carcinocultura na área de influência direta da Comunidade Indígena Tremembé/Almofala – Itarema/CE. *Lauda Técnico*, 38 p.
- Meireles A. J.A. & Marques M. 2005. Estudos e levantamentos ambientais, antropológicos e arqueológicos na Terra Indígena Tremembé de São José e Buriti, município de Itapipoca/CE. *Lauda Técnico*, 125 p.
- Morais J. O., Souza M. J. N., Coutinho P. N. 1975. Contribuição ao Estudo geomorfológico-sedimentológico do litoral de Beberibe (Ceará-Brasil). Fortaleza: *Arq. Ciência do Mar*. 15 (2): 71-78.
- Morais J. O. & Sales V. C. 1985. Geomorfologia da Plataforma Continental do Estado do Ceará. *Anais Simp. Reg. Geol. Natal*, 6: 18-25.
- Morais J. O. 1996. Processos e Impactos Ambientais em Zonas Costeiras- Geologia do Planejamento Regional. *Revista de Geologia*. Fortaleza: 9: 191-242.
- Muehe D. 1998. Estado morfodinâmico praias no instante da observação: uma alternativa de identificação. *Revista Brasileira de Oceanografia*, 46 (2): 157-169.
- Paula J. E. de A. & Morais J. O. de. 2001. Morfodinâmica da Praia de Iguape, Aquiraz-Ceará. In: II Encontro de Pós-Graduação e Pesquisa da Universidade de Fortaleza, 2001, Fortaleza. *Anais do II Encontro de Pós-Graduação e Pesquisa da UNIFOR*. p. 1-20.

- Pereira S. W. M. & El-Robrini M. 2005. *Morfo-topografia da Micro-Região do Salgado Paraense - Região Amazônica*. Salinópolis: Publicações on-line. [http://www.abequa2005.geologia.ufrj.br/nukleo/pdfs/0254\\_salinopolis2005.pdf](http://www.abequa2005.geologia.ufrj.br/nukleo/pdfs/0254_salinopolis2005.pdf).
- Pinheiro L. S. & Morais J. O. 1998. Processos hidrodinâmicos e impactos ambientais no Pontal de Maceió-Fortim-CE. *Anais do VII Encontro de Iniciação Científica - UECE*. Fortaleza. 1: 1 – 20.
- Pinheiro L. de S., Gomes M. L., Falcão T. O., Morais J. O. 2006. *A Influência dos Processos Estuarinos na Morfodinâmica e Vulnerabilidade a Erosão da Prainha de Aquiraz-(Ce)*. Goiânia: VI Simpósio Nacional de Geomorfologia/Regional Conference on Geomorphology, Goiânia, p. 1-20.
- Pinheiro L. S. & Morais J. O. 2007. Shoreline Change of the Mucuripe Harbour Zones (Fortaleza-Ceará, Northeast of Brazil) 1972 – 2003. Australia: *Journal of Coastal Research*. 50: 1163 – 1167.
- Pinheiro L. S., Morais J. O., Medeiros C., Pitombeira E. S. 2006. The gabions for the protection of Caponga Beach, Ceará/Brazil: Hazards and Management. *Journal of Coastal Research*, Itajaí, 39: 848-851.
- Pinto W. D. 1996. *Legislação Federal do Meio Ambiente*. Brasília, IBAMA, II: 1098-1108.
- Ponçano W. L. 1986. Sobre a interpretação ambiental de parâmetros estatísticos granulométricos: exemplo de sedimentos quaternários da costa brasileira. *Revista Brasileira de Geociências*, 16 (2): 157-170.
- Raichich F. 2007. A Study of Early Trieste Sea Level Data (1875-1914). *Journal of Coastal Research*. West Palm Beach, Florida, 23 (4): 1067-1073.
- Raudkivi A. J. 1990. *Loose boundary hydraulics*. 3<sup>a</sup> ed. Ed. Pergamon – UK.
- Reineck H-E. & Singh I. B. 1980. *Depositional Sedimentary Environments*. 2. ed. New, Springer-Verlag. 543 p.
- Sales V. C. C. 2002. *Évolution Géomorphologique de la Zone Côtière le L'état du Ceará, Nord-Est Du Brésil: du Long Terme au Court Terme*. Tese de Doutorado. Paris: Université Paris-Sourbonne. 513 p.
- Sales V. C. & Peulvast J. P. 2007. Evolução Morfoestrutural do Relevo da Margem Continental do Estado do Ceará, Nordeste do Brasil. *Caminhos de Geografia*. (revista on-line) ISSN 1678-6343. Uberlândia, 7 (20): 1 – 21.
- Samat O., Marobin D., Simon B. 2005. Morphologie Cotiere et Amenagements. *Géosciences L'Environnement* (CEREGE). p. 102-110.
- Sedrati M. & Anthony E. J. 2007. Storm-generated morphological change and longshore sand transport in the intertidal zone of a multi-barred macrotidal beach. *Marine Geology*, 244: 209–229.

- Siegle E., Calliari L. J. 2008. High-energy events and short-term changes in superficial beach sediments. *Brazilian Journal of Oceanography*, 56: 149-152.
- SUPERINTENDÊNCIA ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE - SEMACE. 2010. GERCO-CE. *Programa Estadual de Gerenciamento Costeiro*. Fortaleza: SEMACE, 150 p.
- Sherman D. J. & Hotta S. 1990. *Aeolian sediment transport: theory and measurement*. In: Nordstrom, K.; Psuty, N.; Carter, B (Editors). *Coastal dunes: form and process*. p. 17-33, 389 p.
- Short A. D. & Trembanis A. C. 2004. Decadal scale patterns in beach oscillation and rotation Narrabeen Beach, Australia-time series, PCA and wavelet analysis. *Journal of Coastal Research*, 20 (2): 523–532. Disponível em <http://www.jstor.org/stable/4299308>.
- Silva M. G. L. da. 2001. *Avaliação Multitemporal da Dinâmica Costeira da Praia do Pescador, Bragança (norte do Brasil)*. EL-ROBRINI, M. (Docente). Mestrado em Geologia. Universidade Federal do Pará. Belém: UFPA. 113 p.
- Silva M. V. N., Morais, J. O., Pinheiro L. S. 2002. *Evolução Morfodinâmica e Impactos Causados à Planície Costeira do Morro Branco-CE*. In: XLI CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, João Pessoa. *A Geologia e o Homem*. João Pessoa: Sociedade Brasileira de Geologia- Núcleo Nordeste. João Pessoa: Sociedade Brasileira de Geologia- Núcleo Nordeste, 2002. 1: 113-113.
- Silva L. A. C., Araujo R. C. P., Maia L. P., Cavalcate M. D. 2007. *Zoneamento Ecológico-Econômico da Zona Costeira do estado do Ceará*. XLV Congresso da Sober. Londrina. Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural. p. 1-20.
- Silva Filho W. F. 2004. *Domínios Morfoestruturais da Plataforma Continental Do Estado Do Ceará*. Orientador: Iran Carlos Stalliviere Corrêa. Tese de Doutorado. Porto Alegre - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 288 p.
- Souza Filho P. W. M. 2000. *Avaliação e Aplicação de Sensores Remotos no Estudo de Ambientes Costeiros Tropicais Úmidos, Bragança, Norte do Brasil*. Tese de Doutorado. Centro de Geociências. Universidade Federal do Pará. Belém: UFPA. 2000. 236 p.
- Souza Filho P. W. M. & El-Robrini M. 2000. *Coastal Zone Geomorphology of the Bragança Area, Northeast of Amazon Region, Brazil*. *Revista Brasileira de Geociências*, 30: 518-522.
- Souza Filho P. W. M. & Paradella W. R. 2002. *Recognition of the main Geobotanical Features in the Bragança Mangrove Coast (Brazilian Amazon Region) from Landsat TM and RADARSAT-1 data*. *Wetlands Ecology and Management*, 10: 123-132.
- Souza Filho P. W. M. & Paradella W. R. 2003. Use of synthetic aperture radar for recognition of Coastal Geomorphological Features, land-use assessment and shoreline changes in Bragança coast, Pará, Northern Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 75: 341-356.

- Souza Filho P. W. M. & Paradella W. R. 2005. Use of RADARSAT-1 Fine Mode and Landsat-5 TM selective principal component analysis for geomorphological mapping in a macrotidal mangrove coast in the Amazon Region. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 31: 214-224.
- Suguio K. *Introdução a Sedimentologia*. São Paulo: Edgard Blucher. 1973. 317 p.
- Suguio K., Flexor J. M., Azevedo A. E. G., 1986. *Quaternary sedimentary deposits in the states of Paraná and Santa Catarina coastal plains*. In: RABASSA, J. ed. Quaternary of South America and Antarctic Peninsula. Rotterdam A A Baltimor. 4: 3-25.
- Suguio K. *Dicionário de Geologia Marinha*. SP: T.A. Queiroz. 1992. 171 p.
- Suguio K. *Geologia do Quaternário e mudanças ambientais: (passado + presente = futuro?)*. São Paulo: Paulo's Comunicações e Artes Gráficas, 1999. 366 p.
- Slater P. N. 1980. *Remote sensing optics and optical systems*. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, 575 p.
- Stone G. W., Liu B., Pepper D. A., Wang P. 2004. The importance of extratropical and tropical cyclones on the short-term evolution of barrier islands along the northern Gulf of Mexico, USA. *Marine Geology*. 210: 63-78.
- Roratto, E. *Tremores de Terra assustam moradores da Região Norte*. 2008. 2p. Site: <http://images.lane24br.multiply.multiplycontent.com/attachment/0/R9VM5QoKCp8AAD4YV1A1/Tremores%20de%20terra.pdf?nmid=85675603>. Acessado em: 29, dezembro de 2008.
- Trenhaile A. S. 1997. *Coastal Dynamics and Landforms*, Oxford: Oxford University Press. 382 p.
- Thornton E. B., Sallenger A., Sesto J. C., Egley L., Mcgee T., Parsons R. 2006. *Sand mining impacts on long-term dune erosion in southern Monterey Bay*. Dep. of Oceanography, Naval Postgraduate School, Monterey, United States. *Marine Geology*, 229: 45-58.
- Thieller E. R., Martin D., Ergul, A. 2005. The Digital Shoreline Analysis System, version 2.3. *Shoreline change measurement software extension ArcMap 9.0. USGS Open-File*. Disponível em <http://woodshole.er.usgs.gov/project-pages/dsas/>
- Trebossen H., Deffontaines B., Classeau N., Kouame J., Rudant J. P. 2005. Monitoring coastal evolution and associated littoral hazards of French Guiana shoreline with radar images. *Comptes Rendus Geosciences*, 337 (13): 1140–1153. DOI: 10.1016/j.crte.2005.05.013
- Tricart J. 1977. *Ecodinâmica*. IBGE/SUPREN. Rio de Janeiro, 100 p.
- Vermote E. F., Tanre D., Deuze J. L., Herman M., Morcrette J. J. 1997. *Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: An overview*. *IEEE Transactions in Geosciences and Remote Sensing*, 35 (03): 675-686.

- Wright L. D., Guza R. T., Short A. D. 1982. Dynamics of a high-energy dissipative surf zone. *Marine Geology*, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 45: 41-62.
- Wright L. D. & Short A. D. 1984. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A synthesis. *Marine Geology*, 56: 93-118.
- Young D. R., Porter J. H., Bachmann C. M., Shao G., Fusina R. A., Bowles J. H., Korwan D., Donato T. F. 2007. Cross-Scale Patterns in Shrub Thicket Dynamics in the Virginia Barrier Complex. *Ecosystems*, 10: 854–863. DOI: 10.1007/s10021-007-9084-1
- Yoshikawa S. & Nemoto K. 2010. Seasonal variations of sediment transport to a canyon and coastal erosion along the Shimizu coast, Suruga Bay, Japan. *Marine Geology*, 271: 165-176. doi:10.1016/j.margeo.2010.02.010
- Thieller E., Himmelstoss E., Miller, T. 2005. *User Guide & tutorial for the Digital Shoreline Analysis System. (DSAS) version 3.0. Extension for ArcGIS v.9.0.* Part of USGS Open-File Report 2005-1304, 28 p.
- Us Navy. 1978. *Marine climate atlas of the world.* Vol. IV, South Atlantic Ocean. Washington D.C. 325 p.
- Vilas Bôas G. S., Sampaio F. J., Pereira A. M. S. 2001. *The Barreiras Group in the Northeastern coast of the State of Bahia, Brazil: depositional mechanism and process.* Anais da Academia Brasileira de Ciências, 73 (3): 417-427.
- Zullo Junior J., Pinto H. S., Zullo S. A., Pellegrino G. Q. 1997. *Importância da Correção Atmosférica no Cálculo do Índice de Vegetação NDVI a Partir de Imagens AVHRR.* In: Simpósio Brasileiro de Geoprocessamento, 1997, São Paulo. São Paulo: USP, 4: 119-128.