



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA**

**PROCESSOS DINÂMICOS E EVOLUTIVOS DA ZONA COSTEIRA DE ITAMARACÁ
POR SENSORIAMENTO REMOTO E *MEDIDAS IN SITU***

ANA REGINA LIMA UCHÔA DE MOURA

**RECIFE
2009**

ANA REGINA LIMA UCHÔA DE MOURA

**PROCESSOS DINÂMICOS E EVOLUTIVOS DA ZONA COSTEIRA DE ITAMARACÁ
POR SENSORIAMENTO REMOTO E *MEDIDAS IN SITU***

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Oceanografia da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Oceanografia, na área de Oceanografia Física.

Orientadora: Dr^a. Carmen Medeiros Limongi
Co-orientadora: Dr^a. Ana Lúcia Bezerra Candeias

**RECIFE
2009**

M929p

Moura, Ana Regina Lima Uchoa de.

Processos dinâmicos e evolutivos da zona costeira de Itamaracá por sensoriamento remoto e medidas *in situ* / Ana Regina Lima Uchoa de Moura. – Recife: O Autor, 2009.

118 folhas, il : figs., tabs.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, 2009.

Inclui Referências.

1. Oceanografia. 2. Manguezais. 3. Hidrodinâmica. 4. Sensoriamento Remoto. 5. Circulação Residual. I. Título.

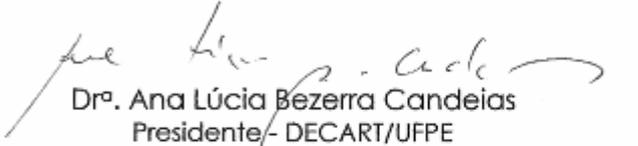
UFPE

551.46

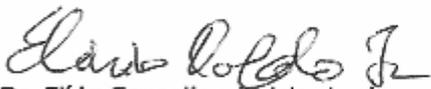
CDD (22. ed.)

BCTG/2009-181

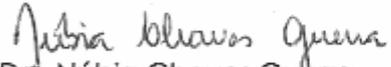
Tese de doutorado apresentada por Ana Regina Lima Uchôa de Moura ao Programa de Pós-graduação em Oceanografia da Universidade Federal de Pernambuco, sob o título: "**Processos Dinâmicos e Evolutivos da Zona Costeira de Itamaracá por Sensoriamento Remoto e Medidas *in situ***", e aprovada pela Banca Examinadora em 31/08/2009, formada pelos professores doutores:



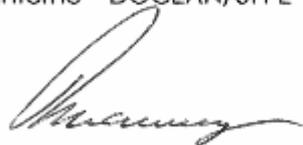
Dr. Ana Lúcia Bezerra Candeias
Presidente - DECART/UFPE



Dr. Elírio Ernestino Toldo Junior
Examinador Externo - CECO/UFRGS



Dr. Núbia Chaves Guerra
Examinador Interno - DOCEAN/UFPE



Dr. Valdir do Amaral Vaz Manso
Examinador Externo - LGGM/UFPE



Dr. Moacyr Cunha de Araújo Filho
Examinador Interno - DOCEAN/UFPE

*Ao meu filho Thiago,
minha alegria e inspiração constantes,
por tanto amor que me é dedicado.*

AGRADECIMENTOS

Ao meu Pai, Octavio Uchôa de Moura Filho e a minha tia Lúcia Figueiredo Uchôa de Moura (*in memoriam*), por olharem sempre por mim.

A minha família, Célio e Thiago, esteio e incentivo durante esses anos, pelas muitas horas roubadas e finais de semana cedidos, como doação incondicional à realização de mais uma etapa em minha vida.

À minha Mãe, Walkíria Barros de Lima pelo apoio que recebi nos momentos importantes.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq (480697/2004-3) pelo apoio financeiro, que permitiu a realização das campanhas oceanográficas, aquisição de imagens de satélite e do software de sensoriamento remoto (ENVI), utilizados no desenvolvimento deste estudo.

Ao Prof. Pedro de Alcântara Neto, Diretor da Escola Politécnica de Pernambuco (POLI), da Universidade de Pernambuco (UPE), pelo apoio institucional.

À prof^a. Ana Lúcia Bezerra Candeias pela orientação, sugestões, apoio e disponibilidade no decorrer desses anos.

À prof^a. Carmen Medeiros Limongi pela orientação.

Aos amigos Flávio Porfírio Alves e Luis Augusto Clemente da Silva, pelo carinho e atenção a mim dispensados, além das discussões nas áreas de geoprocessamento, SIG e cartografia.

Ao Prof. Elírio E. Toldo Jr. (UFRGS) pela atenção e por ter dado a idéia motivadora de estudar o “efeito de molhe hidráulico”, além das importantes discussões na área de hidrodinâmica e valiosas sugestões.

À prof^a. Núbia Chaves Guerra, pelo apoio, disponibilidade e importantes discussões sobre sedimentologia marinha, que muito contribuíram para o desenvolvimento de parte deste estudo.

À Prof^a. Sigrid Neumann-Leitão por todo o apoio que recebi e pelos ensinamentos.

À Conceição Vieira pela amizade e todo o apoio que recebi, desde o período da graduação.

Aos Professores Alexandre Duarte Gusmão e Caetano Monteiro pela compreensão e apoio durante esses anos.

Aos Professores Moacyr Araújo Filho e Tereza Cristina Araújo pelo apoio e cessão do perfilador ADCP.

Ao amigo Rodolfo Araújo da Silva pela atenção e disponibilidade, apoio na coleta dos dados ADCP, importantes discussões técnicas e cessão das rotinas computacionais usadas nesse estudo.

À amiga Dóris Veleda, por todo o apoio e incentivo.

Ao Prof. Valdir Manso pelas sugestões de bibliografias, que foram importantes para este estudo.

Ao Engenheiro João Salgueiro (CPRM), por sua disponibilidade e cessão da série hidrológica de dados pluviométricos.

Ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia (PPGO), que permitiu ampliar meus conhecimentos em uma nova área. Ao corpo docente do PPGO, pelos ensinamentos transmitidos sobre esse fascinante mundo da Oceanografia, através da Física, Química, Biologia e Geologia.

Aos amigos da Oceanografia: Thiago Reis, Fabiana Leite, Patrícia Façanha, Xiomara Garcia, Uina Torres, Victoria Houlgin, Daniele Mallman, Carlos Noriega, Marcus Silva, Mirela Borba e Juliana Ivar; e da Engenharia: Ivan Dornelas, José Anderson de Souza, Catarina Ribeiro dos Santos, Thyago Silveira pelo apoio e troca de conhecimentos.

Aos funcionários do DOCEAN, em especial Myrna Lins, pelo apoio e competência em contornar todos os entraves administrativos ocorridos durante o doutoramento. À Amável e Solange pelo carinho.

Aos amigos do Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e do Tribunal Regional Federal – 5ª Região (TRF5) pelo apoio.

A Elba, pelo carinho e atenção dedicados ao meu bem mais precioso.

RESUMO

A zona costeira de Itamaracá se apresenta como um ambiente altamente dinâmico, no qual interagem processos terrestres e oceânicos que alteram constantemente suas características. Neste contexto, o presente estudo visa compreender os processos causadores de tais mudanças a partir do desenvolvimento e aplicação de metodologias, que incluem o processamento digital de imagens e a obtenção de dados *in situ*. Na primeira etapa, foram utilizados sensoriamento remoto e SIG (Sistema de Informação Geográfica) para analisar a distribuição dos manguezais do sistema estuarino de Itamaracá e identificar as mudanças ocorridas na vegetação, no período compreendido entre 1974 e 2001. A abordagem utilizada foi baseada no método de classificação supervisionada em imagens multiespectrais e multi-temporal SPOT/HRV e Landsat7/ETM+. Foram computadas as áreas preservadas de floresta de mangue (4.118,01 ha), *apicum* (397,28 ha), lavado (464,77 ha) e fazendas de camarão (484,05 ha) a partir de imagens ETM+ (2001), em Itamaracá, Goiana, Itapissuma e Igarassu. A análise temporal foi realizada em 64% da área total do sistema estuarino, onde foi computada uma redução de floresta de mangue em torno de 11%, no período de 27 anos (1974-2001). A taxa anual de desmatamento do manguezal foi de 0,42% (1974-1996) e 0,28% (1996-2001). Por sua vez, áreas ocupadas por fazendas de camarão cresceram 394% (1996-2001). O coeficiente kappa e a exatidão global do mapa temático produzido pelo método de classificação foram de 0,97 e 98,56% (ETM+) e 0,95 e 97,38% (SPOT), respectivamente. Os resultados obtidos apontaram a atividade de carcinicultura como um dos vetores responsáveis pelo desmatamento da floresta de mangue e comprovaram que o desmatamento interferiu na distribuição de sedimentos no CSC. A segunda etapa do estudo baseou-se na premissa de que a circulação é a grande responsável pelo controle e distribuição das partículas sedimentares e que a caracterização de seu padrão pode contribuir para o entendimento de processos deposicionais. Foram realizadas análises da variabilidade espaço-sazonal da circulação (correntometria), dos parâmetros termohalinos (CTD - *Conductivity-Temperature-Depth*) e da presença de sedimentos em suspensão a partir do OBS (retroespalhamento ótico) no braço sul do Canal de Santa Cruz (CSC), durante o ciclo completo de maré. Os parâmetros termohalinos, na camada superficial do CSC, apresentaram pequena variação no final do ciclo. Todavia foi observada uma variabilidade sazonal, com valores médios de temperatura e salinidade, respectivamente, de 30°C e 36 (período seco) e 27°C e 25 (período chuvoso), quando foi registrada maior presença de materiais em suspensão (OBS=88). Em ambos os períodos, não foi observada estratificação em relação à temperatura e à salinidade, ao longo da coluna d'água, indicando que a circulação no braço sul do CSC é, predominantemente, dominada pela forçante da maré. Posteriormente, foram obtidos dados ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*), no intuito de analisar a circulação horizontal e vertical nas desembocaduras do CSC e do rio Timbó. Foram gerados mapas de intensidade e direção das correntes, na superfície, meia água e fundo. Os maiores valores foram observados durante a vazante, apresentando uma média de 0,93 m s⁻¹, na entrada do CSC e, 0,68 m s⁻¹, na desembocadura do rio Timbó. A distribuição vertical obtida pelo ADCP permitiu verificar locais, ao longo da profundidade, em que a componente da corrente segue no sentido oposto ao de fluxo predominante. O sentido do fluxo da circulação residual, nos períodos seco e chuvoso, interferiu no padrão de sedimentação na área de estudo, indicando uma variabilidade sazonal. As intensidades das correntes e a vazão calculada comprovaram, cientificamente, a existência do "molhe hidráulico" na desembocadura sul do CSC, que funciona como uma barreira à deriva litorânea. A terceira etapa da pesquisa buscou o entendimento dos processos de transporte e deposição de sedimentos, associados à hidrodinâmica local, baseada na extração de feições deposicionais. Esta etapa do estudo apresenta uma metodologia que utiliza operadores para detecção de bordas, na banda 1 das imagens SPOT5/HRG (2003) e IKONOS (2005), no intuito de identificar feições de base em águas costeiras rasas. Os resultados foram obtidos a partir do operador *Compass-gradient Prewitt*, que forneceu imagens com feições sedimentares resultantes da ação hidrodinâmica (*sand waves, swash-bar, dique marginal, bancos transversais e canais de fluxo*), além bancos de recifes algálicos. Esse estudo indicou que o uso de dados obtidos por sensores remotos passivos e por medições diretas contribuiu, de forma eficaz, para analisar as alterações nas feições deposicionais da Zona Costeira de Itamaracá.

Palavras Chave: Manguezais. Hidrodinâmica. Parâmetros termohalinos. Circulação residual. Molhe hidráulico. Operadores direcionais. Sensoriamento remoto. SIG. Itamaracá. Brasil.

ABSTRACT

The coastal zone of Itamaracá is like a highly dynamic environment where land and oceanic processes interact altering frequently coastal characteristics. In this context, this current study examines the responsible processes of such changes from the development and application of methodologies, which includes digital image processing and the obtaining of *in situ* data. At the first stage, remote sensing and GIS (Geographic Information System) were used in order to analyze mangrove distribution of the estuarine system of Itamaracá as well as identify the changes in the vegetation from 1974 to 2001. The approach used to estimate the mangrove changes is based at the supervised classification method from multispectral and multi-temporal SPOT/HRV and Landsat7/ETM+ images. As result, preserved areas of mangrove forest (4,118.01 ha), salt flat (397.28 ha), mud flat (464.77 ha) and shrimp farms (484.05 ha) were computed from ETM+ (2001) images in Itamaracá, Goiana, Itapissuma and Igarassu. Temporal analysis was done in 64% of the estuarine system total area and around 11% of mangrove forest reduction was computed in 27 years (1974-2001). The annual rate of mangrove deforestation was 0.42% (1974-1996) and 0.28% (1996-2001). Otherwise, areas of shrimp farms increased 394% (1996-2001). The kappa coefficient and the global accuracy of the thematic map produced by the classification method were, respectively, of 0.97 and 98.56% (ETM+) and of 0.95 and 97.38% (SPOT). Results obtained from this research pointed out the carcinoculture activity as one responsible for the mangrove forest deforestation and also proved it interfered in the sediment distribution at the Santa Cruz Channel (SCC). The second stage of this study is based on the premise that circulation is the main responsible for the control and distribution of sediment particles and the characterization of its pattern may contribute to the understanding of depositional processes. The spatial and seasonal analyses of the circulation (currentmetry), thermohaline parameters (CTD – Conductivity-Temperature-Depth) and suspended sediment presence (OBS – Optical Backscatterance Sensor) were executed at the southern branch of SCC during a whole tidal cycle. The thermohaline parameters in the surface layer of SCC presented small variation at the end of the cycle. However, a seasonal variability was observed with mean values of temperature and salinity, respectively, at 30°C and 36 (dry period), and 27°C and 25 (wet period), when highest values of suspended material (OBS=88) were registered. In both periods, there was no stratification in the water column in relation to temperature and salinity showing that circulation at the south branch of SCC is predominantly ruled by the tidal forcing. Afterwards, ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) data were collected in order to analyze the horizontal and vertical circulation at the SCC's and Timbó River's entrances. Current intensity and direction maps were produced at surface, middle and close to the bottom of the water column. Highest current value was observed during the ebb tide and presented a mean of 0.93 m s⁻¹ at the SCC's entrance, and 0.68 m s⁻¹ at Timbó River's mouth. The vertical distribution obtained from ADCP identified specific sites along the depth where current components flow against the water stream. The flow direction of the residual circulation influenced the sedimentation pattern in the study area during dry and rainy seasons pointing out a seasonal variability. The current intensity and the calculated flow proved scientifically the occurrence of "hydraulic jetty" at the southern mouth of SCC, which works as a boundary to the coastal drift. The third stage contemplates the understanding about the processes of sediment transport and deposition associated to the local hydrodynamics through the extraction of depositional features. It also presented a methodology that uses operators for the edge detection at the band 1 of the SPOT5/HRG (2003) and IKONOS (2005) images in order to identify base features in shallow coastal water. The results were obtained from the Compass-gradient Prewitt operator, which provided images with sediment features caused by hydrodynamics (sand waves, swash-bar, marginal dike, transversal banks, flow channels) and banks algal reefs. This study pointed out that data from passive remote sensors and field campaigns contributed efficiently for analyzing the changes in the depositional features of Itamaracá coastal zone.

Keywords: Mangroves. Hydrodynamics. Termohalinos parameters. Residual circulation. Hydraulic jetty. Directional operators. Remote sensing. GIS. Itamaracá. Brazil.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 3

Figura 1 -	Mapa de localização da zona costeira de Itamaracá, Nordeste do Brasil.	26
Figura 2 -	Geologia do quaternário costeiro do Estado de Pernambuco – Folha Itamaracá (Fonte: Chaves, 2000).	27
Figura 3 -	Manguezais do sistema estuarino de Itamaracá.	27
Figura 4 -	Hietograma das precipitações mensais médias na microrregião Itamaracá – série histórica 2002 a 2007.	28
Figura 5 -	Mapa de Localização da área de estudo, indicando os perfis e as estações de coleta de dados em que foram utilizados o perfilador CTD e o correntômetro.	30
Figura 6 -	Levantamento de dados utilizando o perfilador CTD <i>Sea Bird SBE19</i> .	31
Figura 7	Levantamento de dados a partir do correntômetro <i>Sensordata SD30</i> .	31
Figura 8	Mapa de Localização da área de estudo, indicando os perfis em que foram obtidos os dados utilizando o perfilador ADCP.	32
Figura 9	(a) Células de profundidade de um perfil gerado por ADCP. (b) Geometria dos feixes sonoros do ADCP (Fonte: Tiago Filho, 1999).	33
Figura 10	Levantamento de dados na costa ao sul de Itamaracá, utilizando perfilador ADCP <i>Rio Grande 600 kHz</i> .	33
Figura 11	Localização espacial dos perfis batimétricos	34

CAPÍTULO 4

Figura 1	Feições do ecossistema manguezal (Fonte: CPRH, 2003; Moura, 2007).	38
Figura 2 -	Área de estudo, sistema estuarino de Itamaracá, NE- Brasil.	40
Figura 3 -	Fotografias aéreas do desmatamento dos manguezais e fazendas de camarão em fase de implantação, no sistema Itamaracá (CPRH,2003; Moura,2004).	42
Figura 4 -	Testes de composição de bandas espectrais – satélites Landsat7 e SPOT3.	44
Figura 5 -	Resultado da composição de bandas espectrais para os sensores ETM+ e HRV.	49
Figura 6 -	(a) Carta imagem Landsat ETM+, 2001 (4R, 5G, 7B); (b) Carta imagem SPOT, 1996 (3R, 2G, 2B).	50
Figura 7 -	Mapas temáticos obtidos da classificação das imagens (a) Landsat ETM+ (2001); (b) SPOT (1996).	52
Figura 8 -	Representação esquemática da análise espacial dos manguezais.	53
Figura 9 -	Feições do ecossistema manguezal convertidas em fazenda de camarão.	55
Figura 10 -	Distribuição espacial de floresta de mangue e fazenda de camarão: (a) 1974. (b) 2001.	56
Figura 11 -	Mapa de Fácies Granulométrica do Canal de Santa Cruz (Silva, 2004; 2005; 2008).	57

CAPÍTULO 5

Figura 1 -	Mapas de localização da área de estudo, indicando as estações de coleta e os perfis horizontais: (a) CTD e correntômetro; (b) ADCP.	65
Figura 2 -	Período seco (janeiro/2007). Distribuição espacial da temperatura, salinidade e OBS, nos estágios de preamar (PM) e vazante (VZ).	69
Figura 3 -	Período seco (janeiro/2007). Distribuição espacial da temperatura, salinidade e OBS, nos estágios de baixa-mar (BM) e enchente (EN).	70
Figura 4 -	Período chuvoso (julho/2007). Distribuição espacial da temperatura, salinidade e OBS, nos estágios de vazante (VZ) e baixa-mar (BM).	71
Figura 5 -	Período chuvoso (julho/2007). Distribuição espacial da temperatura, salinidade e OBS, nos estágios de enchente (EN) e preamar (PM).	72
Figura 6 -	Hietograma das precipitações mensais para o ano de 2007, nas estações de Igarassu, Itamaracá e Itapissuma.	73
Figura 7 -	Período seco. Representação esquemática da intensidade e direção das correntes (Correntômetro) medidas na superfície e próximo ao fundo, nos quatro estágios da maré.	75
Figura 8 -	Período chuvoso. Representação esquemática da intensidade e direção das correntes (Correntômetro) medidas na superfície e próximo ao fundo, nos quatro estágios da maré.	76
Figura 9 -	Distribuição horizontal da intensidade e direção da corrente (ADCP): na superfície, a meia água e no fundo. (a) Preamar; (b) Vazante.	77
Figura 10 -	Distribuição horizontal da intensidade e direção da corrente (ADCP): na superfície, a meia água e no fundo. (c) Baixa-mar; (d) Enchente.	78
Figura 11 -	Distribuição vertical das componentes N e L do vetor corrente, na preamar.	80
Figura 12 -	Distribuição vertical das componentes N e L do vetor corrente, na vazante.	80
Figura 13 -	Distribuição vertical das componentes N e L do vetor corrente, na baixa-mar.	81
Figura 14 -	Distribuição vertical das componentes N e L do vetor corrente, na enchente.	81
Figura 15 -	Representação esquemática do fluxo da circulação residual no Canal de Santa Cruz e rio Timbó.	82
Figura 16 -	Fotografia aérea da foz do rio Timbó (Fonte: Coutinho & Guerra, 2004), com indicação dos sentidos de fluxo associados à formação de bancos de areia paralelo e transversal à costa.	83
Figura 17 -	"Efeito de molhe hidráulico no CSC"- banda1 do satélite IKONOS, de 14/12/2005.	86
Figura 18 -	Intensificação do efeito de molhe hidráulico na desembocadura do braço sul do CSC.	88

CAPÍTULO 6

Figura 1 -	Detecção de bordas por operadores de derivação (Gonzalez & Woods, 2002).	94
Figura 2 -	Localização da área de teste, costa sul de Itamaracá, Nordeste do Brasil.	97
Figura 3 -	(a) Uma região 3×3 da imagem original; (b) modelo do operador de gradiente Prewitt, direção x (c) modelo do operador de gradiente Prewitt, direção y ; (d) modelo do operador laplaciano.	98
Figura 4 -	Máscaras de detecção de bordas direcionais (<i>Compass-gradient</i>) Prewitt.	100

Figura 5 -	(a) Imagem original do satélite SPOT5/HRG, banda 1, de 27/07/2003. Resultados da aplicação das máscaras: (b) gradiente Prewitt na direção x (c) gradiente Prewitt na direção y ; (d) laplaciano.	101
Figura 6 -	(a) Imagem original do satélite SPOT5/HRG, banda1, de 27/06/2003. Resultados da aplicação das máscaras direcionais Prewitt: (b) 0° (c) 45° ; (d) 90° , (e) 135° ; (f) 180° ; (g) 225° ; (h) 270° , (i) 315° .	103
Figura 7 -	(a) Imagem original do satélite IKONOS, banda1(450-520 nm), de 14/12/2005. Resultados da aplicação das máscaras direcionais Prewitt na imagem IKONOS: (b) 0° ; (c) 45° ; (d) 90°	106
Figura 8 -	Localização espacial dos perfis batimétricos	107
Figura 9 -	Modelo Digital de Elevação (MDE), sobrepostos à imagem filtrada (direcional Prewitt 45°).	108
Figura 10 -	Perfis batimétricos (A-A'; B-B'; C-C';D-D'; E-E'; F-F'; G-G'; H-H') obtidos a partir de cortes realizados no MDE.	109

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 4

Tabela 1 -	Parâmetros de transformação dos sistemas CÓRREGO ALEGRA-SAD-69 e SAD-69-SIRGAS2000 (IBGE, 2005).	43
Tabela 2 -	Matriz de erro, exatidão global, erros de omissão e comissão, acurácia do produtor, acurácia do usuário e coeficiente kappa, resultante da classificação da imagem SPOT (1996) da zona costeira Itamaracá, Brasil.	51
Tabela 3 -	Matriz de erro, exatidão global, erros de omissão e comissão, acurácia do produtor, acurácia do usuário e coeficiente kappa, resultante da classificação da imagem Landsat ETM+ (2001) da zona costeira Itamaracá, Brasil.	51
Tabela 4 -	Áreas dos manguezais e fazendas de camarão nos municípios de Itamaracá, Goiana, Itapissuma e Igarassu (2001).	53
Tabela 5 -	Área de floresta de mangue nos municípios (1974, 1996 e 2001).	54
Tabela 6 -	Evolução da população e ocupação de floresta de mangue fazenda de camarão (1974, 1996 e 2001).	54

CAPÍTULO 5

Tabela 1 -	Maió/2007. Intensidade máxima da corrente próxima ao fundo, circulação residual (intensidade e direção), tamanho dos grãos e profundidade no centro da seção transversal.	85
Tabela 2 -	Janeiro/2007. Intensidade máxima da corrente próxima ao fundo, circulação residual (intensidade e direção), tamanho dos grãos e profundidade no centro da seção transversal.	85
Tabela 3 -	Julho/2007. Intensidade máxima da corrente próxima ao fundo, circulação residual (intensidade e direção), tamanho dos grãos e profundidade no centro da seção transversal.	85

LISTA DE ABREVIATURAS

AATSR	Advanced ATSR
ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler
AMSR-E	Advanced Scanning Radiometer for the Earth Observing System
APP	Área de Preservação Permanente
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
ATSR	Along Track Scanning Radiometer
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
CERES	Clouds and the Earth's Radiant Energy System
CGT:	campo gravitacional da Terra
Champ	Challenging Minisatellite Payload
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
CONSEMA	Conselho Estadual de Meio Ambiente
CSC	Canal de Santa Cruz
CTD	Conductivity-Temperature-Depth
DOCEAN	Departamento de Oceanografia da UFPE
DSG	Diretoria de Serviços Geográficos do Exército
ENVI	software para análise de dados na área de sensoriamento remoto/SIG
EO1	NASA's Earth Observing-1
EOS	Earth Observing System
ERDAS <i>imagine</i>	software para processamento de imagens satélite remoto
ERTS-1:	Earth Resources Technology Satellite - 1
ESA	Agência Espacial Européia
ETM+:	Enhanced Thematic Mapper Plus
GEOSAT	GEOdetic SATellite
GNSS	Global Navigation Satellite Systems
GOES	Geostationary Operational Environmental Satellites
GRACE	Gravity Recovery and Climate Experiment
HRG	High-Resolution Geometric
HRV	High-Resolution Visible
Hyperion	hyperspectral imager
LAMEPE:	Laboratório de Meteorologia de Pernambuco
LANDSAT	Land Remote Sensing Satellite
MDE:	modelo digital de elevação
MISR	<i>Multi-angle Imaging SpectroRadiometer</i>
MODIS:	Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer
MOPITT:	Measurements of Pollution in the Troposphere (NASA's EOS Terra Spacecraft)
NASA:	National Aeronautics and Space Administration
NDWI:	Normalized Difference Water Index (Índice de Diferença Normalizada da Água)
NOAA:	<i>National Oceanic and Space Administration</i>
OBS:	retroespalhamento óptico
REVIZEE:	Recursos Vivos da Zona Econômica Exclusiva
SAD-69:	South American Datum of 1969
SAR:	synthetic aperture radar
Seasat:	remote sensing of the Earth's oceans
SeaWiFS:	Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor
SIG:	Sistema de Informação Geográfica
SIRGAS:	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SPOT:	Satellite Pour l'Observation de la Terre
TERRA:	Sistema de Observação da Terra (EOS - Earth Observing System)
Topex/Poseidon:	radar altimeter (to map ocean surface topography)
TSM:	temperatura da superfície do mar
UFPE:	Universidade Federal de Pernambuco
VIRR:	Visible and Infrared Radiometer - radar imageador do Seasat

SUMÁRIO

CAPITULO 1

INTRODUÇÃO	14
-------------------------	-----------

CAPITULO 2

ESTADO DA ARTE DO USO DO SENSORIAMENTO REMOTO NO ESTUDO DA ZONA COSTEIRA.....	18
--	-----------

<i>COR DA ÁGUA</i>	<i>21</i>
--------------------------	-----------

<i>TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DO MAR.....</i>	<i>21</i>
--	-----------

<i>BATIMETRIA</i>	<i>23</i>
-------------------------	-----------

<i>GERENCIAMENTO COSTEIRO</i>	<i>24</i>
-------------------------------------	-----------

CAPITULO 3

METODOLOGIA.....	25
-------------------------	-----------

<i>ÁREA DE ESTUDO</i>	<i>25</i>
-----------------------------	-----------

<i>BASE DE DADOS PARA ANÁLISE ESPACIAL DOS MANGUEZAIS.....</i>	<i>29</i>
--	-----------

<i>BASE DE DADOS OCEANOGRÁFICOS.....</i>	<i>29</i>
--	-----------

<i>PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS.....</i>	<i>34</i>
--	-----------

CAPÍTULO 4

ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DOS MANGUEZAIS BASEADO EM SENSORIAMENTO REMOTO E SIG.....	35
--	-----------

<i>RESUMO.....</i>	<i>35</i>
--------------------	-----------

<i>ABSTRACT.....</i>	<i>36</i>
----------------------	-----------

<i>INTRODUÇÃO.....</i>	<i>36</i>
------------------------	-----------

<i>REFERENCIAL TEÓRICO</i>	<i>38</i>
----------------------------------	-----------

<i>ÁREA DE ESTUDO</i>	<i>39</i>
-----------------------------	-----------

<i>MATERIAL E MÉTODOS</i>	<i>41</i>
---------------------------------	-----------

<i>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</i>	<i>49</i>
------------------------------------	-----------

<i>CONCLUSÃO.....</i>	<i>57</i>
-----------------------	-----------

<i>REFERÊNCIAS</i>	<i>59</i>
--------------------------	-----------

CAPÍTULO 5

CIRCULAÇÃO, PARÂMETROS TERMOHALINOS E EFEITO DE MOLHE HIDRÁULICO AO SUL DE ITAMARACÁ.....	62
--	-----------

<i>RESUMO.....</i>	<i>62</i>
--------------------	-----------

<i>INTRODUÇÃO.....</i>	<i>63</i>
------------------------	-----------

<i>METODOLOGIA</i>	<i>64</i>
--------------------------	-----------

<i>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</i>	<i>67</i>
------------------------------------	-----------

<i>CONCLUSÃO.....</i>	<i>89</i>
-----------------------	-----------

<i>REFERÊNCIAS</i>	<i>90</i>
--------------------------	-----------

CAPÍTULO 6

MAPEAMENTO DE FEIÇÕES DE BASE EM ÁGUAS COSTEIRAS RASAS BASEADO EM OPERADORES DIRECIONAIS	92
<i>RESUMO.....</i>	<i>92</i>
<i>INTRODUÇÃO.....</i>	<i>93</i>
<i>DETECÇÃO DE BORDAS POR DERIVADAS.....</i>	<i>93</i>
<i>MÉTODOS.....</i>	<i>96</i>
<i>RESULTADOS E DISCUSSÃO</i>	<i>100</i>
<i>CONCLUSÃO.....</i>	<i>110</i>
<i>REFERÊNCIAS</i>	<i>111</i>

CAPÍTULO 7

CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES.....	112
REFERENCIAS	116

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

As zonas costeiras se caracterizam por espaços em que os ambientes terrestres influenciam os ambientes marinhos e vice-versa (Carter, 1988). Essas áreas têm sido consideradas de grande importância pela comunidade científica nacional e internacional, tanto na conservação de ecossistemas costeiros (Ramsar Convention, 1971), ou na busca de maior conhecimento dos processos costeiros para correlacioná-las aos recursos vivos (Programa REVIZEE, 1995) ou, ainda, visando integrar práticas ambientais ao planejamento de uso e ocupação da zona costeira brasileira (Projeto Orla, 2004).

A multiplicidade de atividades nas zonas costeiras, muitas delas exclusivas do litoral, além de fornecer suporte às economias local e regional, propiciam a ocupação humana (Clark, 1995). No Brasil, a urbanização, a industrialização e o turismo são apontados como os principais vetores responsáveis pelo acelerado processo de ocupação e a conseqüente geração de impactos nas regiões costeiras (Moraes, 1999).

A zona costeira do Estado de Pernambuco apresenta uma densidade demográfica de 971 hab km⁻², o que corresponde ao segmento de maior concentração populacional da costa brasileira (Marroni & Asmus, 2005). As atividades que dão suporte à economia local, além de causar impactos negativos sobre importantes ecossistemas costeiros (Schaeffer-Novelli, 1999), geram conflitos entre os diversos tipos de uso (CPRH, 2001).

Por sua vez, a zona costeira de Itamaracá – PE, objeto deste estudo, assume maior relevo na medida em que os ecossistemas costeiros como o manguezal, a mata atlântica e o *apicum* ou salgado, são inseridos como áreas de Preservação Permanente no Código Florestal Brasileiro - Lei Federal nº 4.771 (BRASIL, 1965). A pressão da população sobre os recursos naturais, nessa região, traz implicações em termos econômicos, sociais e ambientais. Tais implicações justificam a necessidade de ações de planejamento e gestão, que ficam prejudicadas devido à ausência de dados e a impossibilidade de adquirir informações periódicas.

Além da interferência antrópica, essa região é caracterizada por uma acentuada dinâmica que envolve a vazão de rios, as correntes de maré, a ação dos ventos e as correntes litorâneas, os quais agem continuamente sobre a linha de costa. Pouco se conhece sobre a dinâmica que mantém esse segmento de costa em constantes transformações e que influencia o transporte e a deposição de sedimentos ao longo da costa de Itamaracá.

A compreensão dos processos de transporte e deposição de sedimentos, associados à hidrodinâmica local, pode ser beneficiada pela identificação e mapeamento das diferentes feições costeiras presentes em águas rasas. Essas informações constituem subsídios importantes para a navegação, o planejamento de obras de engenharia costeira e a modelagem da hidrodinâmica costeira.

Por outro lado, a dificuldade de acesso e os custos envolvidos na coleta de dados *in situ* são fatores que impõem restrições à manutenção de programas de monitoramento ou desenvolvimento de pesquisas em zonas costeiras. Dessa forma, é necessário buscar instrumentos e tecnologias que permitam identificar, quantificar e espacializar os processos dinâmicos que atuam nessas áreas (Gherardi *et al.*, 2005).

Nesse contexto, a tecnologia de sensoriamento remoto desponta como uma das mais promissoras para aquisição indireta de dados, apresentando as vantagens de uma visão sinóptica da área e precisão nos resultados.

Fundamentado nas observações acima, este estudo busca responder ao seguinte questionamento: quais os processos responsáveis pelas alterações das características na zona costeira de Itamaracá?

Baseia-se o questionamento em referência na hipótese de que a destruição dos manguezais e a hidrodinâmica estão contribuindo para as alterações do padrão e forma de deposição sedimentar, ao sul da ilha de Itamaracá.

Deste modo, apresenta-se como objetivo principal o desenvolvimento e aplicação de metodologia, que utiliza processamento digital de imagens e levantamentos de dados *in situ*, a fim de contribuir para a compreensão dos processos costeiros e evolutivos da zona costeira de Itamaracá. Mais especificamente visa:

- (a) identificar a distribuição dos manguezais do Sistema Estuarino de Itamaracá, bem como detectar e analisar suas mudanças entre 1974 e 2001, a partir das tecnologias de sensoriamento remoto e SIG;
- (b) analisar a variabilidade espacial e sazonal da circulação (correntômetro), dos parâmetros termohalinos e do comportamento de materiais em suspensão a partir do retroespalhamento ótico (OBS), por perfilador CTD (Conductivity-Temperature-Depth), no braço sul do CSC;
- (c) analisar a variabilidade horizontal e vertical da circulação, nas desembocaduras do CSC e do rio Timbó, a partir de dados obtidos por perfilador ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler);
- (d) testar e avaliar o uso de operadores direcionais para extrair as feições de base, em águas costeiras rasas, a partir de imagens de satélite.

Foram utilizados neste estudo dados obtidos por sensores remotos passivos e por medições *in situ* para identificar e analisar as alterações ocorridas nos manguezais e nas feições de base. Os resultados obtidos poderão contribuir para a compreensão da dinâmica na costa ao sul de Itamaracá, haja vista a escassez de dados dessa natureza; além de fornecer o processo evolutivo da distribuição dos manguezais do sistema estuarino de Itamaracá entre 1974-2001. Essas informações poderão, ainda, ser úteis para o gerenciamento da zona costeira de Itamaracá, onde a dinâmica dos processos naturais é acentuada e a interferência antrópica é intensa.

A estrutura de organização desta tese corresponde às diferentes etapas de estudo, que são descritas a seguir.

O capítulo 1 é introdutório, apresentando as justificativas para o estudo, os objetivos e a estrutura de organização da tese. O capítulo 2 aborda o surgimento e evolução do sensoriamento remoto e suas aplicações voltadas ao estudo de zonas costeiras. O capítulo 3 contextualiza a área de estudo e apresenta a base de dados utilizada no desenvolvimento da pesquisa.

Os capítulos 4, 5 e 6 contêm as principais contribuições deste estudo, abordando a motivação e objetivos, a metodologia utilizada e os resultados e discussão.

O uso do sensoriamento remoto e SIG para obtenção da distribuição dos manguezais do sistema estuarino de Itamaracá e, para a detecção de suas mudanças no período de 27 anos, foram abordados no Capítulo 4.

O Capítulo 5 apresenta a análise espaço-sazonal dos parâmetros termohalinos obtidos pelo perfilador CTD e caracteriza o padrão de circulação no braço sul do Canal de Santa Cruz. Esse capítulo também é dedicado à análise horizontal e vertical da circulação na embocadura do braço sul do Canal de Santa Cruz e do rio Timbó. Nessa etapa foi utilizado o perfilador ADCP.

O Capítulo 6 aborda os testes realizados com operadores direcionais, que utilizam derivadas parciais, para extrair feições de base em águas costeiras rasas.

Por fim, no Capítulo 7 são apresentadas a conclusão da tese e as recomendações para continuidade das pesquisas.

CAPÍTULO 2

ESTADO DA ARTE DO USO DO SENSORIAMENTO REMOTO NO ESTUDO DA ZONA COSTEIRA

As zonas costeiras são áreas extensas, de difícil acesso, cuja dinâmica natural e sócio-econômica contribuem de forma desfavorável ao levantamento de dados *in situ*. A dificuldade de manter programas de monitoramento e o alto custo dos métodos diretos, utilizados em campanhas oceanográficas para obtenção de dados, contribuíram para o desenvolvimento de metodologias específicas para extrair essas informações. Nesse sentido, as técnicas de sensoriamento remoto aplicadas ao estudo da zona costeira surgem como uma alternativa para obtenção indireta desses dados.

A *American Society of Photogrammetry*, atribui a origem do sensoriamento remoto ao desenvolvimento dos sensores fotográficos acoplados em balões, os quais foram usados durante a Guerra Civil Americana (1861 - 1865). Após a consolidação do uso da fotografia aérea e o surgimento da ciência da fotogrametria, em torno do fim da I Guerra Mundial (1914 - 1918). No período da II Guerra Mundial (1939 - 1945) novos estudos levaram ao desenvolvimento da tecnologia de medições nas regiões do infravermelho e microondas do espectro eletromagnético. Essa tecnologia se tornou disponível para o uso civil, entre os anos de 1950 a 1960 (Campbell, 2002).

O termo "sensoriamento remoto" se tornou difundido após o lançamento do primeiro satélite meteorológico, TIROS-1, em 1960. Em 1972 foi lançado o primeiro satélite da série LANDSAT, o ERTS-1 (*Earth Resources Technology Satellite - 1*), que hoje fornece uma

cobertura multiespectral repetitiva do mundo para estudos dos recursos da Terra (Campbell, 2002). O desenvolvimento dos radiômetros multiespectrais e o entendimento do comportamento espectral dos diferentes alvos na Terra levaram ao primeiro estudo sistemático a partir de fotografias e radiometria multiespectral coletadas pela missão Skylab (1973) (Robinson, 1985). O período entre 1970 e 1980 marcou a fase dos projetos científicos, em que foram desenvolvidas e refinadas as novas técnicas de observação, como a altimetria por satélites (Torge, 2001). Ainda nesse período, os oceanógrafos perceberam que informações úteis sobre os oceanos também estavam sendo coletadas pelos satélites meteorológicos, nas faixas do visível e do infravermelho. No fim dos anos 70 já estava consolidada a importância dos dados de satélite para o estudo e o entendimento dos oceanos (SOUZA, 2005).

O *Seasat* (junho - outubro de 1978) foi o primeiro satélite projetado para sensoriamento remoto dos oceanos da Terra, com radar de abertura sintética (*synthetic aperture radar* – SAR). O SAR/*Seasat* foi usado para imagear a superfície oceânica (clima de ondas), regiões costeiras, cobertura de neve e calotas polares. A missão foi projetada para testar o monitoramento global por satélite de processos oceanográficos, além de contribuir para determinar as exigências para um sistema operacional de satélite de sensoriamento remoto dos oceanos. Os objetivos específicos eram coletar dados de ventos e temperaturas sobre a superfície do mar, alturas de onda, topografia do oceano, dentre outros. Apesar da falha ocorrida no sistema elétrico da nave, a missão demonstrou a praticabilidade do uso em monitoramento dos oceanos, de sensores na faixa do microondas (Torge, 2001; SEASAT, 2007). Outros satélites importantes para a oceanografia foram o GEOSAT (1985-1988), o ERS-1 (1991-1996), o ERS-2 (1995-até a presente data) e o Topex/Posseidon (1992-2000).

O rápido crescimento da ciência do sensoriamento remoto levou ao desenvolvimento de tecnologias e técnicas pertinentes a diferentes aplicações. A atual meta do sensoriamento remoto é a extração de informações sobre as propriedades do material da superfície da Terra e da atmosfera, concomitantemente, com suas relações geográficas, a partir dos dados rastreados pelos sensores (Campbell, 2002). O avanço tecnológico dos sistemas orbitais, que passaram a levar a bordo sensores hiperespectrais, como o satélite TERRA (1999); o EO1 – Hyperion (2000) ou sensores que alcançaram uma alta resolução espacial, como os satélites IKONOS II (1999), QUICKBIRD 2 (2001), SPOT5 (2002), ALOS (2006) e GeoEye (2008), ampliou a diversidade de estudos aplicados que fazem uso dessa tecnologia.

Os satélites de recursos da Terra, os oceanográficos e os meteorológicos diferenciam-se entre si pelos sensores que levam a bordo e que definem sua finalidade. No entanto, torna-se cada vez mais comum os satélites levarem a bordo múltiplos instrumentos

como o radiômetro, o altímetro, o escaterômetro e o espectrofotômetro, ampliando as suas finalidades. O satélite TERRA (1999) do programa EOS (*Earth Observing System*) da NASA, por exemplo, que visa os estudos sobre a dinâmica da atmosfera global e sobre a interação terra, oceano, atmosfera, leva a bordo os sensores MODIS, ASTER, CERES, MISR e MOPITT.

A ampliação do conhecimento em relação ao comportamento espectral dos alvos presentes na superfície da Terra tornou possível a seleção das melhores combinações de canais e filtros para gerar uma composição colorida, sem correr o risco de desprezar faixas espectrais importantes na discriminação de determinado alvo – solo, vegetação, água etc.

O produto mais comum para a análise de dados de sensoriamento remoto é o mapa temático, que é uma classificação de áreas e feições na imagem. Tem-se como exemplo da identificação do uso e ocupação do solo, classificação de florestas (mangue, mata atlântica) e colheitas. Mesmo quando o mapeamento não consistir no objetivo final, a classificação da imagem é um pré-requisito, pois os dados de sensoriamento remoto também podem ser usados para avaliação de locais apropriados para instalação de indústrias, análise de potencial mineralógico, dentre outros (Campbell, 2002).

Contudo, essa tecnologia não está limitada à interpretação de dados na forma de imagens. Dados de pressão, temperatura e umidade em diferentes níveis da atmosfera e os parâmetros superficiais de temperatura, concentração salina, de gases dissolvidos, sólidos em suspensão etc., que controlam as interações energia/matéria entre o oceano e a atmosfera, podem ser obtidos por sistemas de sensoriamento remoto na superfície oceânica (Kampel, 2002).

O uso do sensoriamento remoto em zonas costeiras fornece uma visão sinóptica da área oceânica costeira, possibilitando a análise espaço-temporal dos processos que lá atuam. Outro aspecto positivo é que os dados obtidos por sensoriamento remoto incorporam, automaticamente, um valor médio por unidade de área e que são importantes para a modelagem numérica (Kampel, 2002). Por outro lado, o alto percentual de cobertura de nuvens, um dos principais problemas no uso de dados obtidos a partir de sistemas passivos de sensoriamento remoto e, a limitação da penetração da radiação eletromagnética no estudo de corpos d'água podem contribuir de forma desfavorável para o uso dessa ferramenta.

Importantes aplicações de sistemas de sensoriamento remoto em estudos das zonas costeiras (continente/oceano) geram informações sobre materiais em suspensão, batimetria, cor da água, temperatura da superfície do mar, topografia, classificação de florestas, uso do solo etc. A seguir são abordadas algumas dessas aplicações.

COR DA ÁGUA

Com o lançamento do satélite meteorológico Nimbus-7 (1978-1986) que levava acoplado o sensor CZCS (*Coastal Zone Color Scanner*) para estudos da cor dos oceanos, foram priorizadas as análises nas zonas costeiras do planeta (SOUZA, 2005). Esse tipo de observação foi retomada com o lançamento do satélite oceanográfico SeaStar (1997) da NASA, levando a bordo o sensor SeaWiFS (*Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor*) que possui uma resolução espacial de 1,13 x 1,13 km (SeaWiFS, 2007).

O sensoriamento remoto da cor da água por sistemas sensores passivos é capaz de monitorar o fluxo radiométrico em diferentes comprimentos de onda (λ), nas faixas do visível e do infravermelho próximo do espectro eletromagnético. Os avanços nas características radiométricas e espectrais possibilitaram o aumento da eficiência de alguns sensores orbitais da cor da água. Esses dados orbitais são aplicados em gerenciamento costeiro, navegação, batimetria, florações de algas etc., e quando usados com algoritmos básicos, fornecem estimativas de materiais em suspensão, das concentrações superficiais de clorofila e da produtividade primária (Kampel e Novo, 2005).

Pesquisas oceanográficas envolvendo o uso de dados orbitais da cor da água incluem estudos de processos dinâmicos de correntes de maré, os quais levam em consideração a distribuição de materiais em suspensão como traçador; e controle da poluição marinha, feito a partir do monitoramento da pluma de sedimentos (indicador) lançada pelos afluentes. Também é possível monitorar plumas de efluentes domésticos ou industriais, quando estes causam alterações na cor da água do mar (Kampel, 2002).

TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DO MAR

Os valores de temperatura da superfície do mar (TSM) têm sido obtidos desde a década de 1970 pelos satélites meteorológicos da série TIROS (*Television Infra Red Observational Satellites*). Essa série é operada pela NOAA (*National Oceanic and Space Administration*) que, atualmente, utilizam o sensor AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) na faixa do infravermelho termal do espectro eletromagnético, para obter as medidas da TSM (Souza, 2005). Além dos satélites TIROS-N NOAA, outros sensores foram lançados, devido à necessidade de monitoramento das águas oceânicas e continentais.

O satélite ambiental ERS-1 (1991-1996) operado pela Agência Espacial Européia (ESA), levava a bordo um conjunto de sensores para aplicações oceanográficas, entre eles o ATSR (*Along Track Scanning Radiometer*), usado para determinar a TSM. Em 1995 foi substituído pelo satélite ERS-2, com pouca modificação na configuração do sensor. A

bordo do satélite ENVISAT (2002) foi lançada a mais nova versão desse sensor, denominada AATSR (*Advanced ATRS*), que apresenta a vantagem de não ter limitação na transmissão dos dados às estações de terra.

Outros sensores foram desenvolvidos visando obter dados de TSM em maiores resoluções espaciais, espectrais e temporais, para aplicações costeiras. A série de satélites meteorológicos GOES (1998) (*Geostationary Operational Environmental Satellites*), operada pela NOAA, gera dados de TSM com alta resolução temporal das imagens (1 hora), quando comparadas com as imagens dos satélites NOAA/AVHRR (6 horas).

O sensor MODIS (*Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer*) a bordo dos satélites TERRA (1999) e AQUA (2002) é um radiômetro que possui 36 canais, com faixas que vão do visível ao infravermelho termal (0,4 μ m a 14 μ m). Os dados obtidos por esse sensor para o cálculo da TSM são processados da mesma forma que os do sensor AVHRR, com a vantagem de dispor de três canais adicionais no infravermelho termal (3,5 e 4 μ m), que permite uma melhor correção para a atenuação do vapor d'água nos algoritmos noturnos.

Ainda a bordo do satélite TERRA, encontra-se o sensor ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) com melhores resoluções espaciais nas faixas que vão do visível (15 metros) ao infravermelho termal (90 metros) e que possibilita maior detalhamento em estudos costeiros e em áreas oceânicas, que os demais sensores termais (Souza, 2005).

Atualmente, as estimativas de TSM podem ser feitas por radiômetros operando na faixa de microondas (10,7 GHz) do espectro eletromagnético, onde a atenuação da atmosfera é praticamente desprezível. Como a quantidade de radiação emitida pelo oceano nessa faixa é muito baixa, torna-se necessária a integração da energia emitida por uma região (*pixel*) de maior dimensão, reduzindo a resolução espacial em torno de 25 km. O sensor AMSR-E (*Advanced Scanning Radiometer for the Earth Observing System*) a bordo do satélite AQUA (2002) é um radiômetro que detecta emissões de microondas vindas da superfície da Terra e da atmosfera e obtém dados de TSM, velocidade do vento, precipitação e umidade da superfície do solo, mesmo em presença de extensa cobertura de nuvens.

As imagens dos oceanos obtidas de sensores remotos nas faixas do infravermelho e do microondas, que fornecem dados da TSM, têm aplicações diretas em estudos de processos oceanográficos e fenômenos meteorológicos, tais como: correntes marinhas, eventos de ressurgência, processos de mistura das águas oceânicas e mudanças climáticas. A vantagem de se usar os dados de TSM a partir de sensores orbitais está relacionada à cobertura espacial dos satélites, que permite a aquisição de dados global.

BATIMETRIA

O aumento da acurácia de técnicas de observação por satélites altimétricos, entre os anos de 1970 e 1980, possibilitou a realização de medidas de fenômenos geodinâmicos, tais como rotação da Terra, deformação da crosta, movimento polar. A partir de 1980, o uso operacional das técnicas de satélite em geodésia, geodinâmica e inspeção levou ao aumento, ainda maior, da acurácia da observação. Nesse período, a altimetria por satélite ajudou a refinar as cartas batimétricas dos oceanos.

O modelo baseado em medidas de altimetria do satélite Seasat (1978) verificou a relação entre ondulação geoidal e profundidade dos oceanos, baseado na teoria da gravitação universal de Newton. Estudos revelaram que a elevação da superfície média dos mares (geóide) segue a topografia da base. Um importante resultado do programa espacial Seasat foi gerar a configuração do assoalho oceânico em águas rasas, obtido da análise do padrão de textura da água, a partir do sensor VIRR (radar imageador) (*The Open University, Milton Keynes, UK*).

Os satélites altimétricos (Seasat, GEOS-3, ERS-1, GEOSAT) usaram o modelo do campo gravitacional da Terra para reproduzir feições da topografia submarina de larga escala. Porém, a reprodução de feições de fina escala e a descrição com acurácia das variações do campo gravitacional da Terra (CGT), foram possíveis com surgimento dos satélites gravimétricos, CHAMP - Challenging Mini-satellite Payload (2000) e GRACE - Gravity Recovery and Climate Experiment (2002), onde importantes feições geofísicas do assoalho oceânico foram reveladas.

O levantamento batimétrico em águas costeiras e estuarinas é importante para a navegação e necessário para modelagem da hidrodinâmica e estudos de monitoramento de erosão/assoreamento (Krug e Noernberg, 2005). Todavia, mapas batimétricos são escassos e incompletos em áreas rasas, devido ao alto custo para realizar esse levantamento com uso do ecobatímetro. Como alternativa, a estimativa da profundidade de águas rasas a partir de imagens multiespectrais se mostrou eficaz para mapear profundidades e feições de fundo, como demonstrado em estudos realizados por Lyzenga (1978) e Philpot (1989).

Melsheimer e Liew (2001) avaliaram o potencial de múltiplas imagens SPOT, nas faixas do visível e do infravermelho próximo, para obter informações batimétricas através de dados ópticos, baseados na atenuação da luz solar pela coluna d'água, a profundidades conhecidas. Lafon *et al.* (2002) calibraram imagens SPOT a partir de medições em campo para extrair informações batimétricas de águas rasas e turvas. Essas medições incluem a reflectância da água e do sedimento de fundo, o coeficiente de

atenuação difusa ao longo da vertical, as concentrações de partículas inorgânicas em suspensão, entre outras. A diferença entre as profundidades medidas e as calculadas pelo modelo usado ficaram em torno de 20%.

Krug e Noernberg (2005) correlacionaram dados batimétricos e diferentes composições de uma imagem Landsat 7 – ETM+ a partir do modelo do Índice de Diferença Normalizada da Água (*Normalized Difference Water Index* – NDWI). Os resultados obtidos para os sistemas estuarinos do Estado do Paraná, indicaram uma boa correlação para uma faixa entre 0,36 a 4,5 metros de profundidade. Recentemente, Bills *et al* (2007) usaram dados do sensor MISR para estimar variações espacial e temporal na profundidade da água durante um estágio de enchente e obtiveram uma acurácia de poucos centímetros.

GERENCIAMENTO COSTEIRO

Após a missão Skylab (1973), estabeleceu-se a importância do uso de um programa contínuo de observação nas faixas do visível e do infravermelho próximo do espectro eletromagnético, para o monitoramento da Terra. O método direto, comumente usado para aquisição de informação sobre as condições ambientais das zonas costeiras – continente e oceano, dá-se a partir de observações e de coleta *in situ*. Em se tratando das águas costeiras, a coleta desses dados envolve o uso de embarcações motorizadas e equipamentos de medição (Beer, 1983). Nesses casos, o uso de métodos diretos, leva a custos altos e, muitas vezes, inviabiliza o desenvolvimento de pesquisas que seriam imprescindíveis como, por exemplo, para a implantação de obras de engenharia costeira.

A parcela continental da zona costeira é alvo de diferentes atividades que levam a mudanças nas condições de uso e ocupação. O uso de sensores remotos para observação de fenômenos de larga-escala, tem se mostrado eficaz, especialmente para mapeamento da cobertura vegetal e de extensos segmentos da costa. A possibilidade de obter informação sobre a ocupação e o uso do solo, além de observar o comportamento e tendências das mudanças geomorfológicas e dos processos que ocorrem na costa, tornam esses estudos, mais rápidos e menos onerosos.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

ÁREA DE ESTUDO

A zona costeira de Itamaracá, representada pela Figura 1, está situada entre as latitudes 7° 35' 41''S e 7° 51' 16''S e longitude 34° 56' 21''W to 34° 48' 16''W. A área de estudo, localizada cerca de 50 km da capital Recife, abrange o município de Itamaracá e, parcialmente, os municípios de Igarassu, Itapissuma e Goiana. Encontra-se inserida na bacia hidrográfica que abrange o Grupo de Pequenos Rios Litorâneos GL-1, definido pelo Plano de Recursos Hídricos do Estado de Pernambuco (PERH/PE, 1998), Nordeste do Brasil.

O embasamento cristalino nessa região é constituído por rochas graníticas e rochas metassedimentares, constituídas principalmente por granitos, migmatitos, gnaisses e xistos (Manso *et al.*, 1992). Estudos geofísicos evidenciaram falhamentos do embasamento cristalino, nos sentidos longitudinal e transversais à costa, cujo processo resultou no isolamento da ilha de Itamaracá por um braço de mar (Kempf, 1970). As águas do mar penetraram nessas falhas, originando o Canal de Santa Cruz. A representação esquemática da geologia do quaternário, referente a Folha Itamaracá, é apresentada na Figura 2.

Nessa região é encontrado o sistema estuarino de Itamaracá, formado pelo Canal de Santa Cruz, que recebe a descarga dos rios Catuama, Itapessoca, Arataca, Botafogo, Congo, Igarassu e Paripe. Esse sistema apresenta grande extensão de manguezal, resultante das condições hidrográficas existentes.

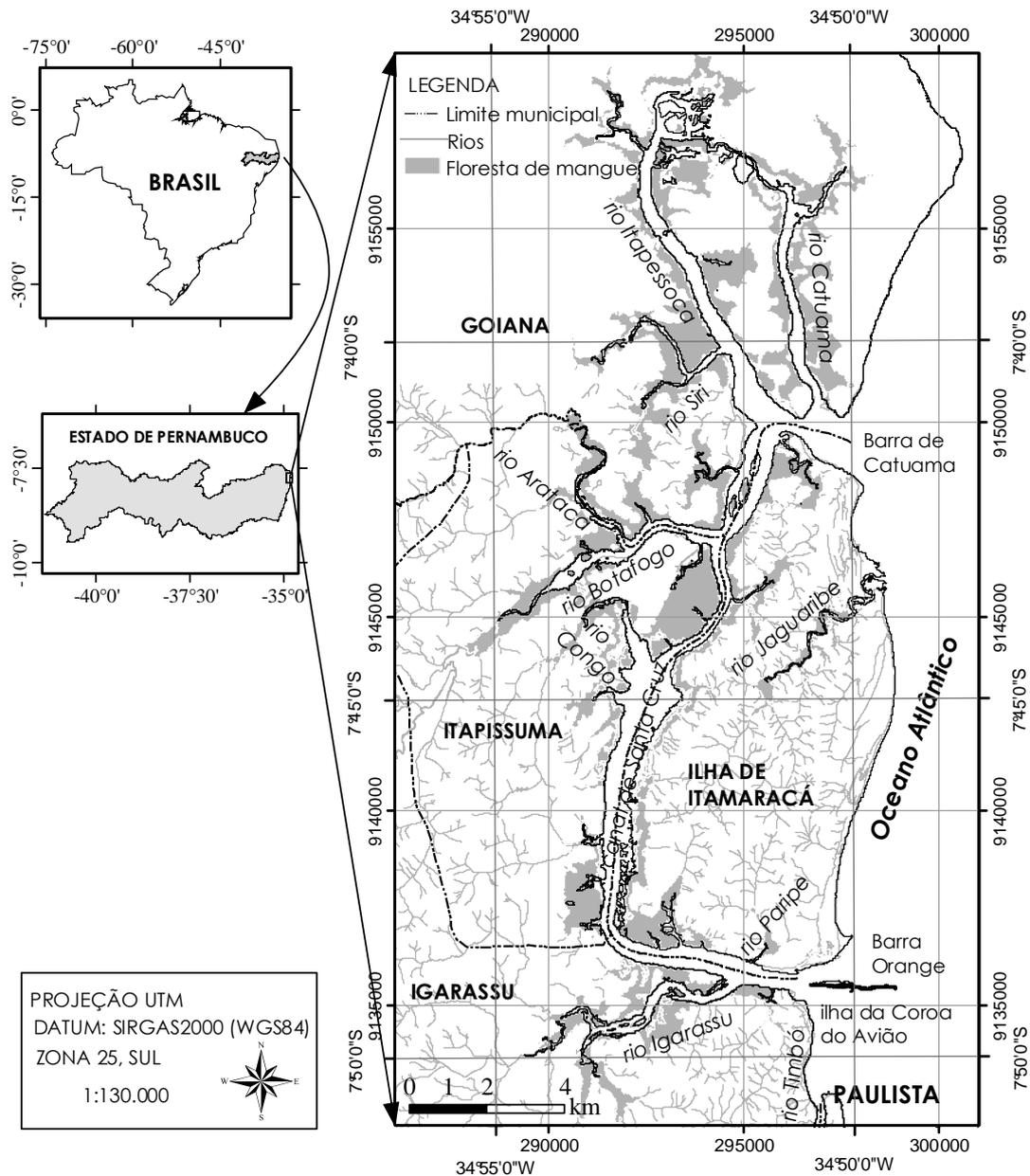


Figura 1 – Mapa de localização da zona costeira de Itamaracá, Nordeste do Brasil.

A ocorrência de manguezais em estuários deve atender a requisitos provenientes da combinação de alguns fatores físicos. Tais requisitos consistem em apresentar uma configuração protegida da ação frontal de ondas e topografia relativamente plana, o que possibilita a deposição dos sedimentos transportados pelos rios. Associado ao fator determinante, isto é a mistura da água doce de sistemas fluviais e de água salgada dos oceanos, favorece o seu desenvolvimento. Os manguezais do sistema estuarino de Itamaracá (Figura 3) apresentam, como principais características, extensos substratos lodosos intemarés e a presença de fauna e flora típicas desse ecossistema.

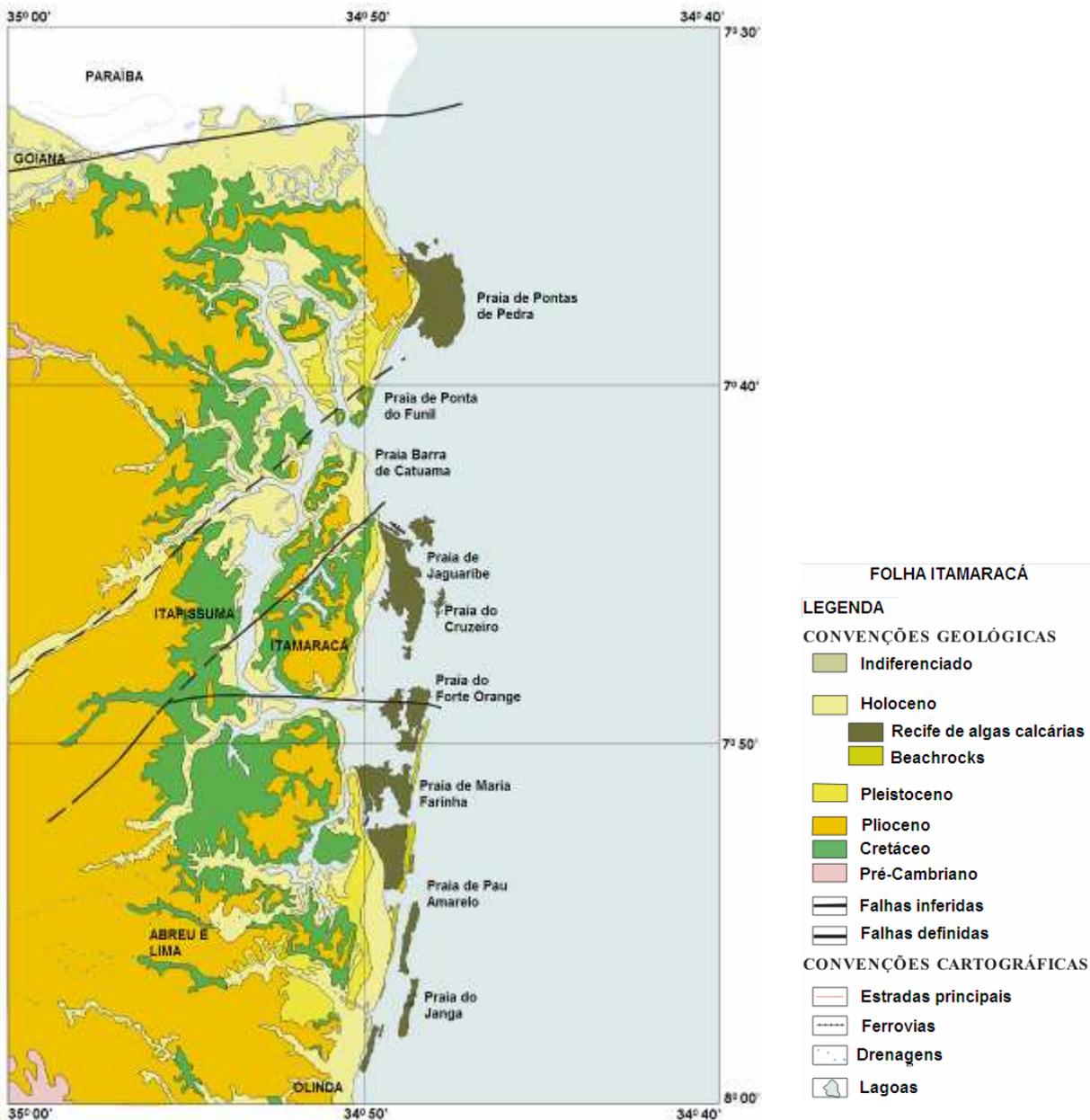


Figura 2 – Geologia do quaternário costeiro do Estado de Pernambuco – Folha Itamaracá (Fonte: Chaves, 2000).



Figura 3 – Manguezais do sistema estuarino de Itamaracá.

A área de estudo é dominada pela oscilação periódica do nível do mar, denominada maré, causada, principalmente, pela atração do sol e da lua em relação à Terra (Suguio, 1992). Durante o período de lua cheia e lua nova o efeito de atração é mais intenso, provocando uma variação de maré muito significativa e o surgimento da maré de sizígia. Seguindo a classificação de Hayes (1979), as marés que atuam na costa de Itamaracá são do tipo mesomaré (1-2 m).

O clima nessa região é tropical, quente e úmido (Köppen tipo Aws), com temperaturas do ar que variam de 18-34 °C (Ratisbona, 1976 *apud* Medeiros, 1991). A precipitação anual média nas estações pluviométricas da microrregião Itamaracá foi 1831mm (Igarassu), 1565 mm (Itamaracá) e 1911 mm (Itapissuma), obtidas da série histórica 2002-2007 (LAMEPE, 2009). Apresenta duas estações bem definidas, caracterizadas por um período seco, de setembro a janeiro e um período chuvoso, de fevereiro a agosto. A Figura 4 apresenta o hietograma da precipitação mensal média, referente à série pluviométrica 2002-2007, relacionada aos períodos seco e chuvoso.

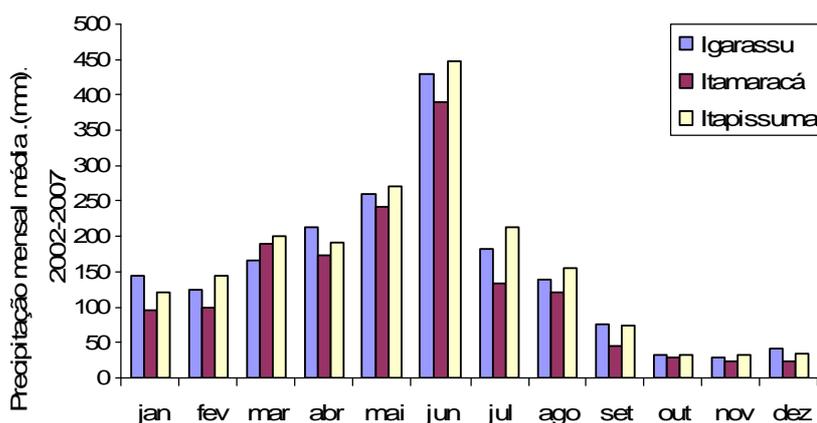


Figura 4 – Hietograma das precipitações mensais médias na microrregião Itamaracá, série histórica 2002 a 2007.

A ocorrência de precipitação pluviométrica influencia na variabilidade dos parâmetros termohalinos das águas costeiras e no comportamento hidrodinâmico do sistema estuarino. Por se tratar de um fenômeno natural aleatório, a distribuição espacial da chuva não se repete em cada período, mas fornece estimativas em relação ao quantitativo e indica locais de maior ou menor ocorrência. No estudo de Salgueiro e Montenegro (2008), foi utilizado método geoestatístico para analisar a distribuição espacial da precipitação na bacia hidrográfica do rio Pajeú-PE, cuja análise foi baseada na elaboração de mapas gerados por interpolações e estimativa de erros. Trabalhos dessa natureza são importantes para o gerenciamento dos recursos hídricos e, quando desenvolvidos na zona costeira, poderão contribuir para as análises da variabilidade sazonal da circulação das águas, temperatura, salinidade, materiais em suspensão.

BASE DE DADOS PARA ANÁLISE ESPACIAL DOS MANGUEZAIS

Os dados espaciais representam objetos e fenômenos, onde a localização geográfica é uma característica inerente para tratá-los. Com objetivo de determinar a distribuição dos manguezais do sistema estuarino de Itamaracá e detectar suas mudanças ao longo do tempo, foi necessário estruturar uma base de dados para realizar a análise espacial em um Sistema de Informação Geográfica. Para tanto, foi seguido o modelo para estruturação de Base de Dados proposto por Sá (2001), o qual consiste num conjunto de entrada e processamentos e que fornecem subsídios ao sistema gerenciador de banco de dados, para recuperar e transformar dados em informações (Burrough, 1986).

Nesse estudo, a modelagem foi realizada buscando abstrair o mundo real e levá-lo ao ambiente computacional, com objetivo de armazenar, recuperar, manipular e controlar a base de dados, possibilitando a análise. Os dados espaciais são formados por dados gráficos (mapas temáticos) e descritivos (alfanuméricos) e caracterizados por sua posição em relação a um sistema de referência; pelo conjunto de atributos que possuem; pela relação espacial entre as variáveis e pelo tempo. Por fim, as variáveis espaciais foram integradas à Base de Dados Espaciais, a qual foi armazenada em um Sistema de Informações Geográficas.

BASE DE DADOS OCEANOGRÁFICOS

Os dados obtidos em ambiente marinho foram coletados durante três campanhas oceanográficas, realizadas no braço sul do Canal de Santa Cruz e no segmento de costa entre a ilha da Coroa do Avião e a desembocadura do rio Timbó, ao sul da ilha de Itamaracá.

METODOLOGIA DE USO DO PERFILADOR CTD E CORRENTÔMETRO

A região de estudo apresenta uma sazonalidade marcada por duas estações do ano: verão e inverno. Por isso, para analisar a variabilidade espaço-sazonal no braço sul do CSC, os dados foram coletados durante as duas campanhas oceanográficas, realizadas nos períodos seco (janeiro/2007) e chuvoso (julho/2007), durante a maré de sizígia.

Nessa etapa do estudo foi utilizado um perfilador CTD (*Conductivity-Temperature-Depth*) *Sea Bird SBE19*, equipado com sensores para obtenção de temperatura, pressão e condutividade, em função da qual foram determinados os valores de salinidade. Acoplado ao CTD, um sensor de retroespalhamento ótico (OBS), cujo sinal está relacionado à presença de materiais em suspensão na água. O levantamento dos parâmetros termohalinos e de OBS ocorreram nos estágios preamar, vazante, baixa-mar e enchente da maré, nas doze estações amostrais (Figura 5). Em laboratório, foram utilizadas rotinas computacionais de filtragem para eliminar valores espúrios e integrar os dados a cada 10 cm, ao longo da coluna d'água.

Concomitantemente ao levantamento de dados de temperatura, salinidade e OBS, foi realizado o levantamento hidrodinâmico, com uso do correntômetro *Sensordata SD30*, a partir de medições instantâneas de intensidade e direção da corrente, na superfície, a meia água e no fundo (Figura 5). A execução das medições com o perfilador CTD e correntômetro estão ilustradas nas figuras 6 e 7.

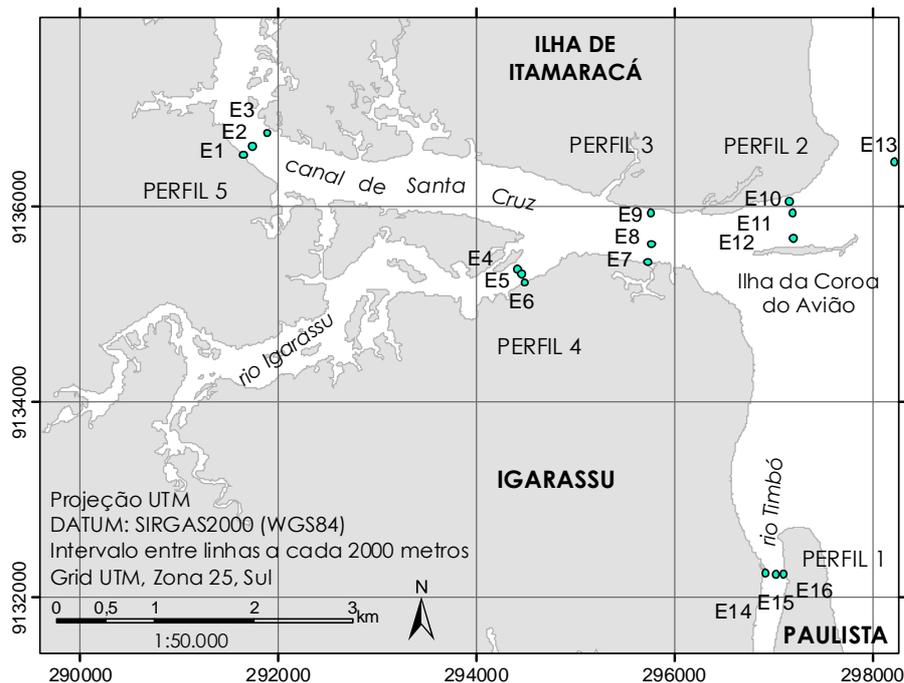


Figura 5 – Mapa de Localização da área de estudo, indicando os perfis e as estações de coleta de dados em que foram utilizados o perfilador CTD e o correntômetro.



Figura 6–Levantamento de dados utilizando o perfilador CTD Sea Bird SBE19.



Figura 7 - Levantamento de dados a partir do correntômetro SensorData SD30.

METODOLOGIA DE USO DO PERFILADOR ADCP

Para analisar a variabilidade horizontal e vertical da circulação no segmento de costa, ao sul de Itamaracá, foram preferidos levantamentos hidrodinâmicos durante o mês de maio de 2007. Nessa etapa do estudo foi utilizado o perfilador *Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) Rio Grande 600 kHz*, ao longo de perfis posicionados próximos à desembocadura do CSC e rio Timbó, ilustrado na Figura 8.

O princípio de funcionamento do perfilador de correntes ADCP consiste na emissão de ondas sonoras através da coluna d'água. Por sua vez, as partículas em suspensão transportadas pelas correntes (sedimentos, plâncton etc.) refletem parte das ondas emitidas de volta para o instrumento, que percebe o eco através de sensores, reconhecendo as diferentes profundidades e as velocidades das respectivas linhas de corrente, através do efeito Doppler. Assim, o ADCP determina a velocidade das partículas em suspensão que é a mesma da corrente da água (Tiago Filho *et al.*, 1999). Além disso, o ADCP determina a vazão em seções transversais de rios, através do somatório de sucessivos perfis de corrente, obtidos em tempo real (CERPCH, 2007).

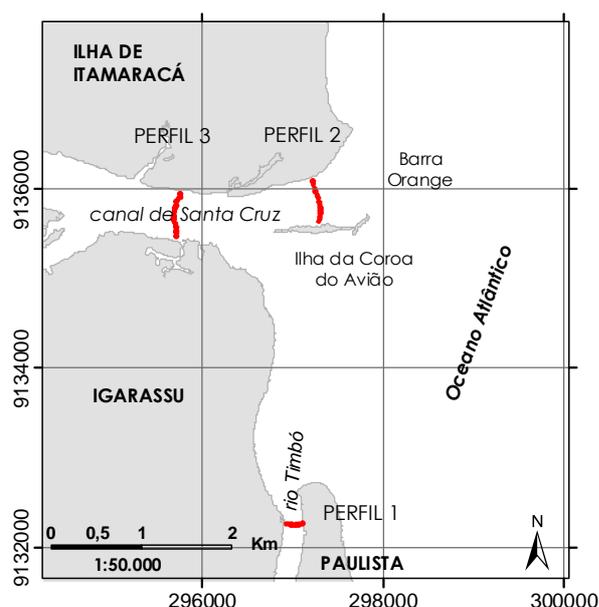


Figura 8 – Mapa de Localização da área de estudo, indicando os perfis em que foram obtidos os dados utilizando o perfilador ADCP.

O perfilador Doppler se utiliza da variação na frequência do sinal emitido, causada pelo movimento relativo entre o emissor (aparelho) e o receptor (partículas em suspensão). Neste estudo, a execução das medições foi realizada numa embarcação em movimento, com a utilização do recurso de *bottom tracking*¹ (rasteio de fundo) para garantir a compensação da velocidade relativa entre o barco e o escoamento.

A geração dos perfis de velocidade ocorre através da divisão de cada vertical (*ensemble*) em várias “células de profundidade” (*bins* ou *cells*) uniformes, ilustrados na Figura 9a. O número de células de cada vertical depende da profundidade total e do tamanho de cada célula.

Os feixes sonoros do ADCP (Figura 9b) medem duas componentes do vetor da corrente de água. Como elas não estão na mesma direção, podem ser transformadas em dois vetores ortogonais (horizontal e vertical). Um segundo par de feixes sonoros, girados de 90° graus do primeiro par, gera outro conjunto de vetores, totalizando três vetores ortogonais (x, y, z), que são as três componentes do vetor velocidade da corrente (u, v, w) (Tiago Filho, 1999).

¹ Método para medir a velocidade em aplicações marítimas, o qual utiliza um sonar que emite longos pulsos acústicos. O *bottom tracking* utiliza-se de um pulso mais longo, com alcance aproximadamente duas vezes maior que o dos pulsos utilizados para a medição de velocidade (RD INSTRUMENTS, 2003).

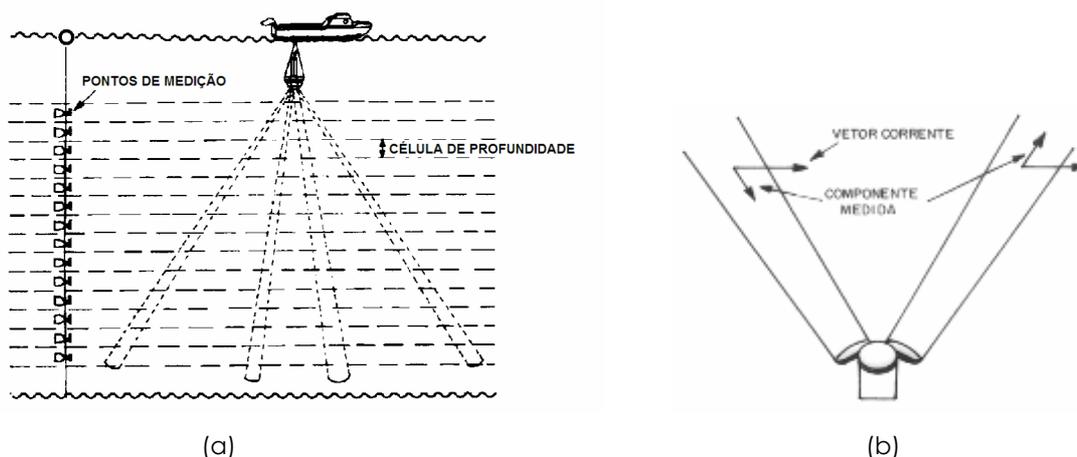


Figura 9 –(a) Células de profundidade de um perfil gerado por ADCP. (b) Geometria dos feixes sonoros do ADCP (Fonte: Tiago Filho, 1999).

No momento da medição foi fornecido, a partir de um *laptop* conectado ao ADCP, a bordo da embarcação, um tamanho para a “célula de profundidade” de 0,25 m. Isso significa que a cada 0,25 m, o ADCP realiza a amostragem de várias velocidades dentro desta célula. Conseqüentemente, a vazão de cada célula é calculada a partir da média dessas velocidades, obtidas através de uma função de ponderação triangular.

O algoritmo para processamento de vazão no ADCP, a partir do perfil de velocidade da água e dados de trajetória de fundo, foi desenvolvido por K.L. Deines em testes no Rio Mississippi, no ano de 1982. Uma vantagem deste algoritmo de medição é que não há necessidade de que o barco percorra uma trajetória em linha reta, podendo atravessar um rio ao longo de uma trajetória arbitrária e ainda coletar uma medição precisa de vazão (Simpson & Oltmann, 1993 *apud* Tiago Filho, 1999).

As intensidades e direções das correntes foram tomadas nos quatro estágios de maré, cuja medição está ilustrada na Figura 10.



Figura 10 – Levantamento de dados na costa ao sul de Itamaracá, utilizando perfilador ADCP Rio Grande 600 kHz.

Na etapa de processamento de dados foi utilizado um conjunto de rotinas de programação com objetivo de gerar planilhas para representar graficamente a distribuição vertical e horizontal da intensidade da corrente sobre a base cartográfica da área de estudo. A cada nove registros do ADCP, foi tirada uma média dos valores de intensidade e posicionado o *stick* na mediana, para a representação gráfica horizontal da intensidade e direção das correntes.

LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO

A batimetria do segmento de costa entre a Coroa do Avião e a foz do rio Timbó, foi realizada em janeiro de 2007, com o objetivo de construir perfis transversais a partir do modelo digital de elevação (MDE), para fundamentar as interpretações das formas de fundo. Os perfis batimétricos, ilustrados na Figura 11, representam 7.600 pontos amostrais que foram levantados em profundidades variando entre 0,80 m e 5,0 m, a partir de um ecossonda GPSMAP 298, durante o estágio de preamar.

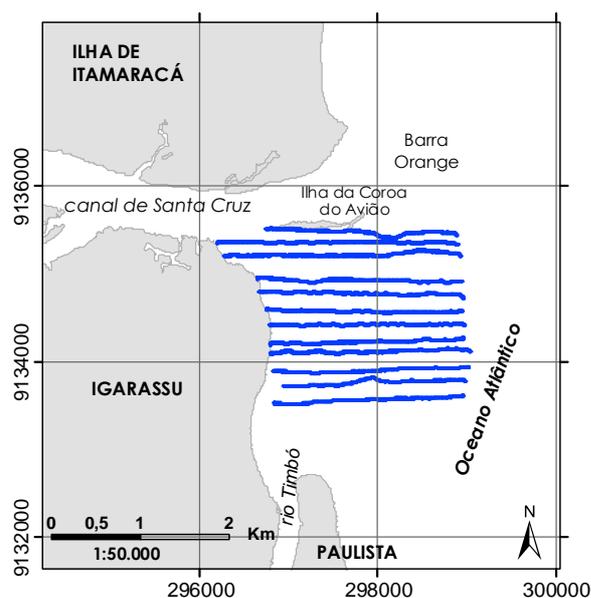


Figura 11 – Localização espacial dos perfis batimétricos

PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

Durante o desenvolvimento do estudo foram aplicadas técnicas de processamento de imagens para identificar, realçar, filtrar e extrair as feições presentes nas imagens de satélite. Nessa etapa foram utilizados os softwares ENVI e ERDAS *image*.

CAPÍTULO 4

ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DOS MANGUEZAIS BASEADO EM SENSORIAMENTO REMOTO E SIG

RESUMO

Embora estejam sob proteção legal, os manguezais do Brasil vêm sendo paulatinamente reduzidos, quer por ações diretas, tais como aterros, desmatamento, ocupação para fins residenciais, turísticos e agro-aquícolas ou indiretas como poluição dos cursos fluviais. Nesse estudo foram utilizados sensoriamento remoto e SIG para analisar a distribuição dos manguezais do sistema estuarino de Itamaracá, Nordeste do Brasil, além de identificar as mudanças ocorridas na vegetação, no período entre 1974-2001. A abordagem utilizada para estimar as alterações na área ocupada por manguezais, considerada uma variável contínua, foi baseada no método de classificação supervisionada em imagens multiespectrais e multi-temporal SPOT/HRV e Landsat7/ETM+. Ortofotocartas, mapas dos recursos hídricos superficiais e informações obtidas em campo foram utilizados como fontes complementares de dados. Áreas preservadas de floresta mangue (4.118,01 ha), *apicum* (397,27 ha), lavado (464,77 ha) e fazendas de camarão (484,05 ha) foram obtidas a partir de imagens ETM+ (2001), em Itamaracá, Goiana, Itapissuma, Igarassu. A análise temporal foi realizada em 64% da área global de estudo, para os anos 1974, 1996 e 2001. No período de 27 anos (1974-2001), verificou-se uma diminuição da área de floresta de manguezal em torno de 11,06%. A taxa anual de desmatamento do manguezal foi de 0,42% (1974-1996) e 0,27% (1996-2001). Áreas ocupadas por fazendas de camarão cresceram 394,12% entre 1996 e 2001, a uma taxa média anual de 66,67%. O coeficiente kappa e a exatidão global do mapa temático produzido pelo método de classificação foram de 0,97 e 98,56% (ETM+) e 0,95 e 97,38% (SPOT), respectivamente. O uso do sensoriamento remoto e SIG mostraram-se eficientes para detectar alterações ocorridas nas áreas de manguezais e fornecer importantes informações para tomada de decisão, além de propor ações voltadas para o desenvolvimento sustentável das atividades costeiras, no sistema estuarino de Itamaracá.

Palavras-Chave: Manguezais, Sensoriamento remoto, SIG, Fazenda de camarão, Itamaracá, Brasil.

ABSTRACT

Despite being under legal protection, the quantity of Brazilian mangroves has been gradually reduced, because of either direct actions (landfills, deforestation, urban expansion, tourism, agriculture, and aquaculture activities) or indirect actions (pollution of rivers). Control and law enforcement in mangrove areas require continuous monitoring, which is difficult to accomplish from ground and/or water based surveys. In this study, satellite images and GIS were used to analyze the distribution of mangroves along the Itamaracá estuarine system in Northeastern Brazil, beyond identifying changes in vegetation from 1974 to 2001. The approach used to estimate changes in the area occupied by mangroves as a continuous variable was based in the supervised classification method in multispectral and multi-temporal SPOT/HRV and Landsat7/ETM+ data. Orthophotomaps, superficial hydric resources map, and field data were used as complementary data sources. Regions of preserved mangrove forest (4118.01 ha), salt flats (397.27 ha), mud flats (464.77 ha), and shrimp farms (484.05 ha) were computed from ETM+ data (2001) in Itamaracá, Goiana, Itapissuma, and Igarassu cities. Temporal analysis was carried out in 64% of the global study area for the years 1974, 1996, and 2001. Based on GIS analysis over the 27 year (1974-2001), the area of the mangrove forest was found to have decreased by 11.06%. The annual rate of mangrove deforestation was 0.42% (1974-1996) and 0.27% (1996-2001). Areas occupied by shrimp farms expanded by 394.12% between 1996 and 2001 at a mean annual rate of 66.67%. The kappa coefficient and the overall accuracy of the thematic map produced by the classification method was 0.97 and 98.56% (ETM+) and 0.95 and 97.38% (SPOT), respectively. Application of remote sensing and GIS proved to be efficient to detect changes of mangrove areas and provide relevant information to guide decisions and propose actions concerning sustainable development of coastal activities in the Itamaracá estuarine system.

Keywords: Mangrove; Remote sensing; GIS; Shrimp farm; Itamaracá, Brazil.

INTRODUÇÃO

A zona costeira brasileira possui um segmento de 8.698 km de extensão e um elevado contingente populacional de 121 hab km⁻² (MMA, 2007). Essa região apresenta características que beneficiam as atividades sócio-econômicas, refletindo na rápida ocupação dessas áreas, as quais estão vinculadas a diferentes tipos de atividades, muitas vezes, conflitantes entre si (Moraes, 1999).

O Estado de Pernambuco, Nordeste do Brasil, corresponde ao segmento da zona costeira de maior concentração populacional do país, de 971 hab km⁻² (Marroni e Asmus, 2005). Um dos problemas ambientais que ameaçam a costa de Pernambuco é a devastação dos manguezais decorrente de atividades antrópicas.

O sistema estuarino Itamaracá, Norte de Pernambuco, foi formado durante o início do Holoceno. A ilha de Itamaracá é resultante do processo de falhamentos geológicos no embasamento cristalino, que foram preenchidas pelas águas do mar, formando o Canal de Santa Cruz - CSC (Kempf, 1970). Surge, assim, uma condição propícia

ao desenvolvimento dos manguezais, que ocuparam as terras baixas, ao longo da parte interna do CSC e às margens de seus afluentes.

Apesar da relevância sócio-econômica, como fonte de alimento e de renda para a população de sua cercania através da pesca artesanal, os manguezais de Itamaracá têm sido constantemente ameaçados pela poluição (Meyer *et al.*, 1998; Telles, 2001) e desmatamentos, para dar espaço à expansão urbana e às atividades econômicas de aqüicultura e agricultura (CPRH, 2001). O estuário de Itamaracá é caracterizado por uma extensa área, de difícil acesso. O controle e aplicação da lei nas áreas de manguezal exigem um acompanhamento contínuo, o que é difícil de concretizar por meio terrestre ou pelo uso de embarcações. Esta característica propicia o aumento da degradação e dificuldade de controle pelos gestores ambientais.

As rápidas mudanças que ocorrem na região requerem o uso de técnicas que viabilizem a extração de informações e a manutenção de programas de monitoramento de sua evolução, em termos operacionais e de custo acessível. Nesse contexto, o sensoriamento remoto desponta como a tecnologia de aquisição de dados, que apresenta natureza sinóptica e possibilita análises temporais. O armazenamento, manipulação e análise dos dados podem ser realizados com o uso de Sistema de Informações Geográficas (SIG), que irá compatibilizar os dados espaciais gerados pelo sensoriamento remoto e os dados descritivos, além de fornecer novas informações (D'Alge, 2007) em tempo mais reduzido.

Zonas costeiras e estuarinas recebem atenção especial em muitos países, que buscam desenvolver estudos integrados para dar subsídios às ações de gerenciamento (Clark, 1995). A conservação do ecossistema manguezal, considerado como Área de Preservação Permanente (APP) pelo Código Florestal Brasileiro (Lei Federal nº 4.771, de 15.09.1965), tem sido foco de diversos estudos (Schaeffer-Novelli, 1999; Siqueira Filho, 1998; Machado, 1991; Maciel, 1991). Tratados internacionais também fazem referência ao assunto, tal como estabelecido na Convenção Ramsar, em 1971 (Ramsar Convention, 2007), onde foram propostos a conservação das zonas úmidas e o uso sustentável de seus recursos.

Com a finalidade de auxiliar no gerenciamento dos recursos naturais da região de Itamaracá, esse estudo utiliza as tecnologias de sensoriamento remoto e SIG para identificar e analisar espacialmente a distribuição dos manguezais no sistema estuarino de Itamaracá, bem como, detectar suas mudanças ocorridas no período entre 1974 e 2001.

O método usado difere dos demais por fornecer informações sobre as feições que compõem o ecossistema manguezal (floresta de mangue, *apicum* ou salgado e lavado) e possibilitar o seu reconhecimento a partir de amostras obtidas *in situ* (verdade

terrestre). Análises científica e legal foram realizadas para diferenciar essas componentes e identificá-las nas imagens de satélite. Os resultados obtidos poderão ser úteis para o gerenciamento das áreas estuarina e costeira de Itamaracá, já que os métodos utilizados apresentaram-se eficazes em estudos de ecossistemas costeiros.

REFERENCIAL TEÓRICO

Estudos científicos demonstram que os manguezais são compostos por: vegetação (floresta de mangue), lavado (zona submersa em todas as preamares) e *apicum* ou salgado (zona mais elevada de solo geralmente arenoso, que ocorre na interface médio/supra litoral e, raramente, no interior das florestas) (Figura 1). Entre esses elementos há uma íntima relação em termos geológicos, geomorfológicos, físicos, químicos e biológicos (Maciel, 1991). Essas três feições, portanto, podem ser consideradas pertencentes ao mesmo sistema (Bigarella, 1947; Schaeffer-Novelli, 1999; Pacheco *et al.*, 2002). Resultados de análises de sedimentos, realizadas em área de *apicum*, indicaram que as camadas inferiores são tipicamente manguezais, devido à presença de matéria orgânica, nutrientes e salinidade características dos manguezais (Nascimento, 1993).



Figura 1 – Feições do ecossistema manguezal (Fonte: CPRH, 2003; Moura, 2007).

De acordo com a legislação brasileira, art. 2º da Lei Federal n° 4.771/65, as florestas e demais formas de vegetação natural situadas nas restingas, como fixadoras de dunas ou estabilizadoras de mangues, são consideradas Áreas de Preservação Permanente (APP) pelo só efeito da Lei (BRASIL, 1965). Todavia, esse tratamento se restringe apenas à vegetação. Num segundo momento, verifica-se em alguns documentos legais (CONAMA n°004, 1985; CONAMA n°303, 2002), o surgimento de definições que consideraram o manguezal em toda sua extensão e que levam ao entendimento de que as áreas de

apicum e a vegetação de manguezal fazem parte do mesmo ecossistema.

Entretanto, de um modo geral, a definição legal imprecisa em relação às feições do ecossistema manguezal, vem possibilitando aos órgãos de gerenciamento, no Estado de Pernambuco, a adoção de medidas que deixam de considerar a área de *apicum* como feição do manguezal. Por essa razão, vige em Pernambuco a Resolução nº 02, CONSEMA (2002), a qual autoriza a ocupação de parte dessas áreas (30%) por fazendas de camarão, indo de encontro à resolução que proíbe, expressamente, essa atividade em áreas de manguezais (CONAMA nº312, 2002).

No presente estudo, as áreas de floresta de mangue, *apicum* e lavado são considerados feições do ecossistema manguezal, tomando como base estudos científicos e a Lei Federal nº 4.771/1965.

A magnitude das perdas dos manguezais é uma preocupação mundial, haja vista a redução de 35% da vegetação de mangue no planeta desde 1980, e que traduzem em uma perda anual de 2,1% (Valiela *et al.*, 2001).

Estudos baseados no uso de sensoriamento remoto indicaram que, em alguns Estados do Nordeste do Brasil, a atividade de carcinicultura é apontada como responsável pela supressão dos manguezais (Cavalcanti *et al.*, 2007; Carvalho, 2004; Crepani & Medeiros, 2003). Por sua vez, o trabalho realizado pela CPRH (2001) indica que a atividade de carcinicultura no Estado de Pernambuco é responsável por gerar sérios conflitos com a população que depende dos recursos do manguezal.

Além do desmatamento, Wosten *et al.* (2003) mostraram que os manguezais absorvem o lixo gerado pelas fazendas de camarão. Igualmente identificaram que a cultura de camarão adiciona nutrientes aos manguezais através das descargas de água e de sedimentos, durante a despesca (Thu e Populus, 2007). Deste modo, o monitoramento da qualidade das águas do estuário é imprescindível para verificar se o excesso de nutrientes lançados durante a despesca, prejudica a fauna presente nos manguezais ou causa alterações na água e nos sedimentos do estuário (Wang *et al.*, 2003).

ÁREA DE ESTUDO

O sistema estuarino de Itamaracá está situado entre as coordenadas UTM (SIRGAS) 9.159.994 N a 9.131.334 N e 276.027 E a 301.029 E. Essa região inclui o município de Itamaracá e parcialmente os municípios de Igarassu, Itapissuma e Goiana (Figura 2).

Encontra-se inserida na bacia hidrográfica que abrange o Grupo de Pequenos Rios Litorâneos GL-1, definido pelo Plano de Recursos Hídricos do Estado de Pernambuco (PERH/PE, 1998), Nordeste do Brasil.

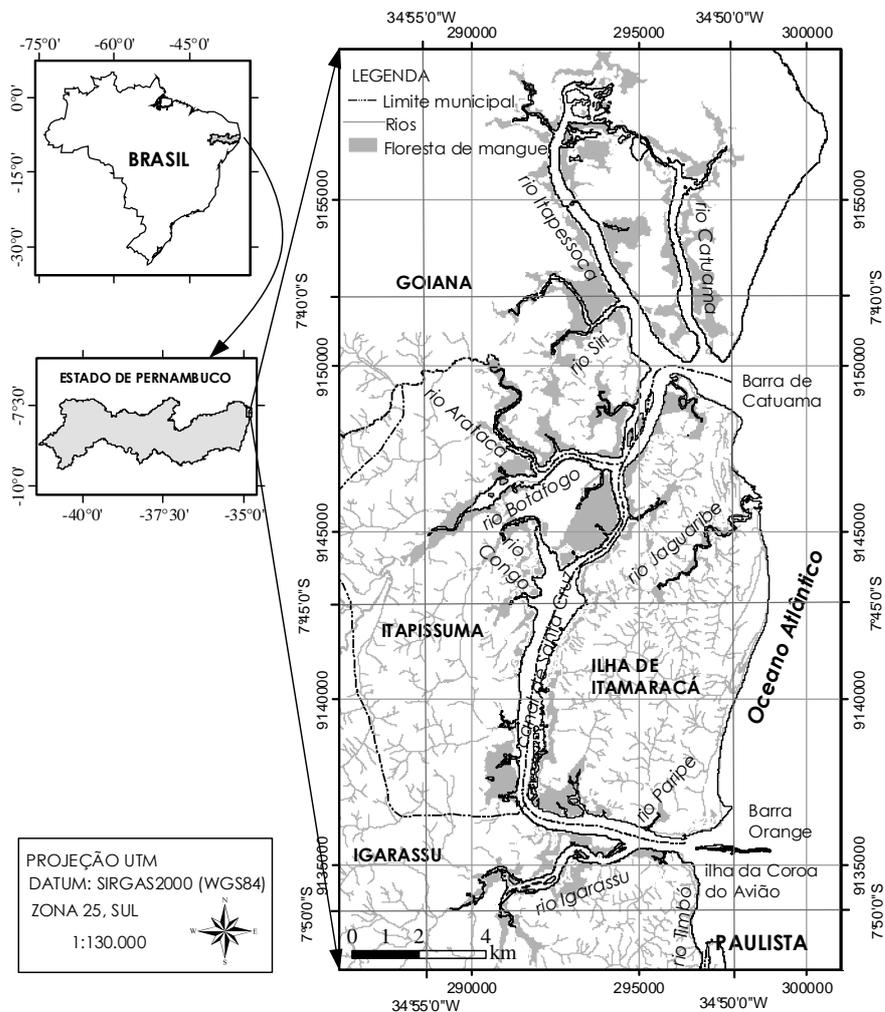


Figura 2 – Área de estudo, sistema estuarino de Itamaracá, NE- Brasil.

A região de estudo apresenta um clima quente e úmido, do tipo Aws, segundo o sistema Köppen. A temperatura anual média do ar é de 26°C, com precipitação anual média em torno de 1500 mm e submetida à influência dos ventos alísios de sudeste (Medeiros e Kjerfve, 1993). O sistema recebe a drenagem dos rios Catuama, Itapessoca, Arataca, Botafogo, Congo, Igarassu e Paripe via Canal de Santa Cruz, que está conectado ao Oceano Atlântico através da Barra de Catuama, ao Norte e da Barra Orange, ao sul. O sistema estuarino do rio Jaguaribe é independente da rede hidrográfica acima citada. Essa característica decorre do fato de que a nascente desse rio se encontrar na ilha de Itamaracá e desagua diretamente no Oceano Atlântico.

Os manguezais de Itamaracá ocupam a porção interna do canal de Santa Cruz e ao longo das seções mais baixas dos rios. As espécies dominantes são *Rhizophora mangle* (mangue vermelho), *Laguncularia racemosa* (mangue branco) e *Avicennia shaueriana* (mangue preto), contra mais de vinte espécies encontradas no manguezal Indo-Pacífico (Kempf, 1970). São observadas na área de estudo algumas ocorrências de vegetação associada ao manguezal da espécie *Conocarpus erectus* - mangue de botão (Silva, 1995).

A economia local é baseada, principalmente, nas atividades de turismo, pesca artesanal, indústria, agricultura e aqüicultura.

MATERIAL E MÉTODOS

MATERIAIS

Os dados utilizados foram obtidos de forma remota e extraídos quatro fontes principais: (1) ortofotocartas de 1974 (escala 1:10.000, UTM: Córrego Alegre, zona 25, sul), as quais contêm informações planialtimétricas; (2) mapeamento dos recursos hídricos superficiais da Região Metropolitana do Recife, de 1978 (realizado a partir de fotografias aéreas de 1974) (escala 1:10.000, UTM: Córrego Alegre, zona 25, sul); (3) imagens do Satellite Pour l'Observation de la Terre / High-Resolution Visible (SPOT/HRV), com três bandas multiespectrais (20 m), de 22/agosto/1996 e pancromática (10 m) de 20/julho/1998; e (4) imagens multispectrais (30 m) e pancromática (15 m) do satélite Landsat7/ Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+), datada de 4/agosto/2001.

As imagens do sensor ETM+ foram fornecidas pela University of Maryland (<http://glcfapp.umiacs.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>). As ortofotocartas e o mapeamento cartográfico foram obtidos na Agência Estadual de Planejamento e Pesquisas de Pernambuco (CONDEPE/FIDEM). A Rede Hidrográfica foi extraída a partir do mapeamento dos recursos hídricos superficiais da Região Metropolitana do Recife, na escala de 1:10.000.

LEVANTAMENTO BASEADO EM OBSERVAÇÕES TERRESTRE

Levantamentos realizados por meio terrestre e sobrevôo foram realizados para confirmação da verdade terrestre. A identificação desses alvos auxiliou na escolha das áreas de treinamento, que foram usadas no processo de classificação supervisionada das imagens de satélite. Áreas desmatadas de floresta de mangue e expansão de fazendas de

camarão foram detectadas e georreferenciadas durante os sobrevôos realizados em 2003 e 2004 (Figura 3).



Figura 3 – Fotografias aéreas do desmatamento dos manguezais e fazendas de camarão em fase de implantação, no sistema de Itamaracá (CPRH,2003; Moura,2004).

METODOLOGIA DE TRANSFORMAÇÃO PARA O SISTEMA DE REFERÊNCIA GEODÉSICO SIRGAS

O Brasil, por meio da Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), adotou um Sistema de Referência Geodésico que permite a localização de qualquer feição da Terra e em suas proximidades, tomando-se por referência o centro de massa da Terra. Esse novo sistema, denominado Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS), é compatível com a precisão dos métodos de posicionamento (GNSS – Global Navigation Satellite Systems) e com os sistemas adotados no globo terrestre (IBGE, 2005).

Para a uniformização dos Sistemas de Referência Geodésico da base de dados utilizada nesse estudo, as imagens de sensoriamento remoto e dos mapeamentos cartográficos foram compatibilizados entre si, em relação ao sistema geodésico SIRGAS2000 e ao sistema de projeção UTM.

A transformação dos dados do sistema geodésico Córrego Alegre, que usa o elipsóide internacional de Hayford, 1924, para o SIRGAS2000, foi efetuada em duas etapas: (1) uso do *software* GT87 (Diretoria de Serviços Geográficos do Exército) para transformar dos dados do sistema geodésico CÓRREGO ALEGRE para SAD-69 (South American Datum of

1969) e (2) Uso do software TCGeo do IBGE, para transformar os dados do sistema geodésico SAD-69 para o sistema SIRGAS2000. Os parâmetros usados para as transformações se encontram na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros de transformação dos sistemas Córrego Alegre - SAD-69 e SAD-69-SIRGAS2000 (IBGE, 2005).

PARAMETROS		CÓRREGO ALEGRE para SAD-69 (m)	SAD-69 para SIRGAS (m)
Semi-eixo maior do elipsóide do sistema de origem	a_1	6.378.388,00	6.378.160
Achatamento do elipsóide do sistema de origem	f_1	1/297,00	1/298,25
Semi-eixo maior do elipsóide no sistema de destino	a_2	6.378.160,00	6.378.137
Achatamento do elipsóide no sistema de destino	f_2	1/298,25	1/298,257222101
Parâmetro de transformação entre os sistemas	Δx	-138,7	-67,35
Parâmetro de transformação entre os sistemas	Δy	+164,40	+3,88
Parâmetro de transformação entre os sistemas	Δz	+34,40	-38,22

METODOLOGIA PARA IDENTIFICAR OS MANGUEZAIS POR SENSORIAMENTO REMOTO E SIG

Estudos recentes utilizaram sensoriamento remoto e SIG para determinar causas de desmatamentos e avaliar as características da distribuição da floresta de mangue com o passar tempo, em diferentes países (Thu & Populus, 2007; Rajintha *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2003; Murray *et al.*, 2003). Esses estudos forneceram importantes informações para as ações de gerenciamento dos recursos costeiros, em relação ao desenvolvimento sustentável de suas atividades.

Métodos de processamento digital de imagens (Lillesand & Kiefer, 1994) foram empregados em imagens SPOT e Landsat para detectar mudanças nos manguezais (Giri *et al.*, 2007; Thampanya *et al.*, 2006; Berlanga-Robles & Ruiz-Luna, 2002; Ramírez-García *et al.*, 1998; Green *et al.*, 1997). Os resultados apresentados apontaram uma aceitável acurácia das técnicas e dos produtos.

Em geral, o desempenho da classificação das imagens de satélite pode ser obtido a partir da matriz de erro da classificação (Congalton *et al.*, 1983). O estimador kappa (Ponzini & Almeida, 1996; Ramírez-García *et al.*, 1998; Berlanga-Robles & Ruiz-Luna, 2002) pode então ser usado para avaliar quantitativamente essa matriz de erro (Lillesand & Kiefer, 1994). As técnicas usadas nessa etapa do estudo, para obter as componentes dos manguezais (floresta de mangue, *apicum* e lavado), são baseadas nos métodos acima citados.

Composição de Bandas e Fusão de Imagens

Foram testadas composições de bandas espectrais do satélite Landsat ETM+, a fim de escolher a combinação R, G, B, que melhor destacasse os alvos de interesse para o estudo. Filtros de realce de bordas foram aplicados em ambas as imagens.

Para melhorar a resolução espacial e a interpretabilidade dos dados, as imagens pancromáticas e multiespectrais do Landsat ETM+ e SPOT foram fusionadas, o que permitiu integrar imageamentos de diferentes resoluções espaciais. Para tanto, foram utilizadas a técnica por componentes principais e o método de reamostragem do vizinho mais próximo (Lillesand & Kiefer, 1994). A Figura 4 ilustra algumas das combinações de banda espectrais testadas.

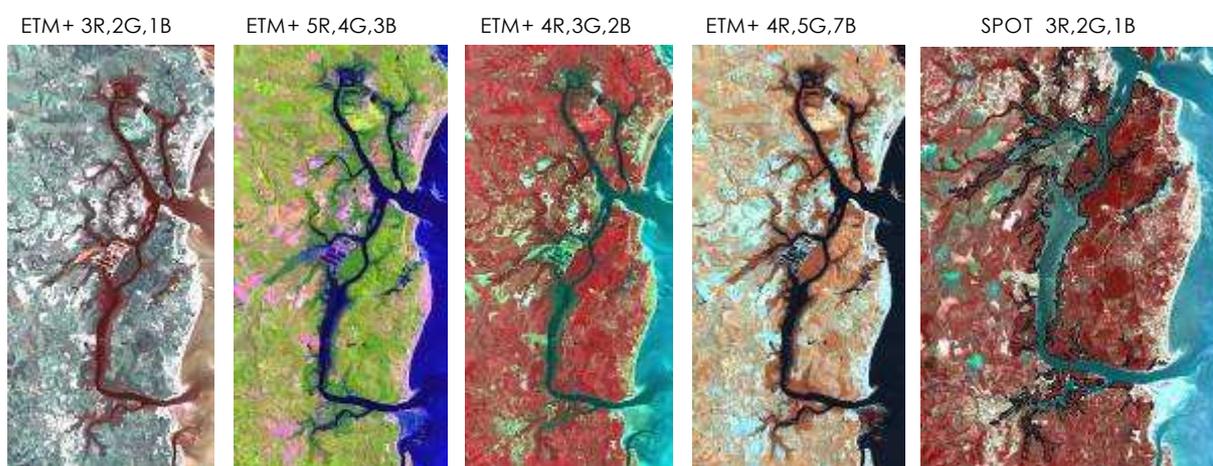


Figura 4 - Testes de composição de bandas espectrais – satélites Landsat7 e SPOT3.

Registro da Imagem

O processo de registro de uma imagem consiste na reamostragem dos pixels segundo um sistema de coordenadas, de forma que a imagem assuma as propriedades de escala e de projeção de uma determinada base cartográfica. Para tanto, foi utilizado o método da Máxima Verossimilhança. As ortofotocartas (escala 1:10.000) foram usadas como base cartográfica, de onde foram retirados os pontos de controle (GCP's) com as referências, para o registro dessas imagens. Nessa etapa, a dificuldade encontrada foi a desatualização das ortofotocartas e dos mapas cartográficos existentes na região estudada.

Processamento Digital das Imagens para Análise Preliminar

As técnicas de processamento utilizadas neste estudo são baseadas nos DN's (digital numbers). Essas técnicas foram aplicadas para realizar análises preliminares, tais

como, realce da imagem, filtragem, classificação não supervisionada e, por fim, análise de principais componentes que visa descorrelacionar as bandas e gerar uma nova combinação R, G, B, com mais contraste entre as classes. Além disso, contribuíram para os processos de interpretação visual e classificação da imagem.

A aplicação de contraste por transformação linear sobre as imagens, possibilitou o realce dos alvos estudados e as informações obtidas pela classificação não supervisionada auxiliaram na obtenção da verdade terrestre.

Classificação Supervisionada

O procedimento de classificação consiste em categorizar automaticamente todos os *pixels* da imagem em classes ou temas, que definem a cobertura da superfície terrestre. Para efetuar a classificação, quatro classes (floresta de mangue, lavado, corpo d'água e outras classes) foram estabelecidas.

As áreas de treinamento foram selecionadas com base nos resultados de informações de campo. As amostras foram extraídas pela digitalização de polígonos homogêneos (> 200 *pixels*, exceto para a categoria "lavado") sobre a imagem e, codificada de acordo com cada classe. O padrão espectral de cada classe foi usado como a base para a categorização numérica, pois os diferentes objetos representam combinações distintas de níveis digitais (DN), com base nas suas propriedades intrínsecas de reflectância espectral (Lillesand & Kiefer, 1994). Finalmente, foi procedida a classificação supervisionada, que utiliza a informação espectral do *pixels* para reconhecer os polígonos homogêneos na imagem.

Avaliação da acurácia da classificação

O desempenho da classificação foi avaliado nesse estudo pela matriz de erro da classificação, que compara a relação entre os dados de referência (verdade terrestre) e os resultados obtidos pela classificação automatizada, categoria por categoria (Lillesand & Kiefer, 1994). Algumas medidas descritivas foram obtidas a partir da matriz de erro, tais como exatidão global, exatidão do produtor, exatidão do usuário, erros de omissão e erros de comissão, para avaliar a classificação das imagens SPOT e ETM+ (Tabelas 2 e 3). A exatidão global da classificação foi calculada dividindo o total do número de *pixels* classificados corretamente (soma dos elementos da diagonal principal) pela quantidade total de *pixels* amostrados (n). Este valor é obtido pela aplicação da expressão:

$$\text{exatidão} \cdot \text{global} = \sum_{i=1}^c x_{ii} / n \quad (1)$$

onde: c é o número de categorias ou classes e x_{ii} é o número de *pixel* classificado corretamente para cada categoria. Semelhantemente, foram calculadas as exatidões das categorias individuais, dividindo o número de *pixels* classificados corretamente em cada categoria pelo número total de *pixels* amostrados na coluna (exatidão do produtor) ou linha (exatidão do usuário) correspondentes.

Através da matriz de erro foi possível avaliar os erros que ocorreram no processo da classificação. Esses erros são representados pelos elementos não diagonais da matriz. Os erros de omissão (E_o) correspondem aos elementos não-diagonais da coluna e indicam número de 'pixels' que deveriam ter sido classificados e foram excluídos da categoria. Da mesma forma, os erros de comissão (E_{co}) são representados pelos elementos não-diagonais da linha que indicam os 'pixels' que foram incluídos incorretamente em uma categoria. Estes erros (E_o e E_{co}) foram calculados a partir das expressões:

$$E_o = (x_{+i} - x_{ii}) / x_{+i} \quad (2)$$

$$E_{co} = (x_{i+} - x_{ii}) / x_{i+} \quad (3)$$

onde x_{+i} =total de *pixels* amostrados da coluna i e x_{i+} =total de *pixels* amostrados da linha i .

O estimador *kappa* \hat{k} foi usado como indicador para avaliar a matriz de erro da classificação. É uma medida baseada na diferença entre a exatidão real (observada entre os dados de referência e uma classificação automática) e o acerto por puro acaso (entre os dados de referência e uma classificação aleatória) (Lillesand & Kiefer, 1994). Pode alcançar valores entre $0 < \hat{k} < 1$. Quanto mais próximo de 1, melhor a classificação e pode ser calculada por:

$$\hat{k} = N \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r (x_{i+} \cdot x_{+i}) / N^2 - \sum_{i=1}^r (x_{i+} \cdot x_{+i}) \quad (4)$$

onde: $N \sum_{i=1}^r x_{ii}$ = exatidão real; $\sum_{i=1}^r (x_{i+} \cdot x_{+i})$ = acerto por puro acaso; r = o número de linhas na matriz de erro; x_{ii} = número de observações na linha i e coluna i ; x_{i+} = total de observações na linha i ; x_{+i} = total de observações na coluna i ; e N = total de número de observações incluídas na matriz.

O estimador *kappa* incorpora os elementos não diagonais da matriz, como um produto das linhas e colunas marginais. Ao contrário do índice de exatidão global, que considera apenas os elementos diagonais da matriz de erro.

Pós-Classificação das Imagens

O processo de pós-classificação consiste em eliminar os erros gerados no processo de classificação e obter áreas homogêneas dos polígonos, que representam as categorias analisadas.

Normalmente, utiliza-se um filtro 3x3, baseado no parâmetro estatístico da moda (*majority*), para reduzir os ruídos da imagem classificada. Esse filtro opera com baixa frequência para remover os *pixels* isolados. Procedimentos como a checagem de informações e a recodificação de classes também foram efetuadas para corrigir os erros gerados no processo de classificação. Nessa etapa, houve a inserção de classes na imagem classificada, tais como, apicum/salgado e fazenda de camarão, obtidos a partir da digitalização sobre as imagens.

METODOLOGIA PARA OBTER VEGETAÇÃO DE MANGUE A PARTIR DE MAPEAMENTO CARTOGRÁFICO

A Floresta de mangue referente ao ano de 1974 foi digitalizada a partir do Mapeamento dos Recursos Hídricos de Superfície da Região Metropolitana do Recife (1974), que contém informações sobre os recursos hídricos superficiais e áreas alagadas. As ortofotocartas (1974) foram utilizadas para ajustar as informações obtidas no mapeamento supracitado.

As nove ortofotocartas (1974) foram escaneadas, transpostas para o formato digital e, posteriormente, mosaicadas. A correção geométrica foi processada com os pontos de controle terrestre (GCP's) distribuídos em toda a imagem mosaicada. As coordenadas de referências para o registro da imagem foram obtidas das próprias ortofotocartas. O erro RMS de 1 pixel (0,85 m), foi portanto, aceito para a transformação UTM: Córrego Alegre, zona 25, sul que, posteriormente, foram transformadas para o sistema de referência geodésico SIRGAS2000 (WGS84). A área correspondente à fazenda de camarão, até o ano de 1974, foi extraída a partir de ortofotocartas em meio digital.

MODELAGEM DE DADOS ESPACIAIS E ANÁLISE SIG

Um Sistema de Informações Geográficas (SIG) pode ser definido como “um conjunto de programas para coleta, armazenamento, recuperação sob demanda, transformação e apresentação de dados espaciais do mundo real para um propósito particular” (Burrough e Mcdonnell, 1998). O uso de SIG para o monitoramento de ecossistemas costeiros é eficiente por possibilitar a integração, manipulação e a realização de análise espacial. Tal análise utiliza as relações das variáveis que se encontram no espaço geográfico, a partir da combinação e do processamento de dados gráficos e descritivos.

A estruturação de uma Base de Dados Espaciais antecede a etapa da análise espacial e, consiste num conjunto de entrada e processamentos, que fornecem subsídios ao sistema gerenciador de banco de dados, para recuperar e transformar dados em informações (Burrough, 1986). Nesse estudo foi seguido o modelo para estruturação de Base de Dados proposto por Sá (2001), onde foi realizada a modelagem dos dados espaciais a partir da abstração do mundo real e sua transferência ao ambiente computacional.

A realidade foi modelada através de estruturas gráficas e descritivas: (a) as variáveis espaciais, que fazem parte do mundo real, tais como, floresta de mangue, *apicum*, lavado, fazendas de camarão e municípios, foram definidas; (b) os atributos espaciais foram descritos e armazenados em formato tabular; (c) foram criadas as relações espaciais entre as variáveis; (d) por fim, foi relacionada a componente “tempo” aos dados espaciais. Uma vez modelados, os dados espaciais foram integrados a Base de Dados Espaciais, a qual foi armazenada no Sistema de Informações Geográficas ArcGIS 9.2.

Informações adicionais foram sobrepostas aos dados gráficos já armazenados no SIG e análise espacial foi desempenhada fornecendo novas informações gráficas e referentes a dados quantitativos (área de manguezais; área de cada componente dos manguezais; áreas desmatadas etc.).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

PROCESSAMENTO DE IMAGEM

O registro das imagens SPOT e Landsat ETM+ indicou um erro médio residual (RMS) inferior a 0,5 *pixel*. Isso significa que as imagens utilizadas tiveram boa aceitação para a transformação e, assim como os estudos realizados por Thu & Populus

(2007); Giri *et al.* (2007); Wang *et al.* (2003), mostram-se adequadas para a análise espacial e temporal da distribuição dos manguezais. As áreas de *apicum* foram extraídas das imagens SPOT e ETM+ a partir da combinação de bandas na faixa do visível e do infravermelho. Com a classificação das imagens e geração de mapas temáticos, foi possível realizar medições e obter os dados quantitativos referentes às áreas de floresta de mangue, *apicum*, lavado e fazendas de camarão.

As composições de bandas no infravermelho 4R, 5G, 7B da imagem Landsat ETM+ e de bandas no visível e no infravermelho próximo 3R, 2G, 1B da imagem SPOT (Figura 5), apresentou um bom resultado qualitativo, na identificação visual das categorias analisadas, que é importante no processo de reconhecimento dos alvos utilizado no processo de classificação supervisionada.

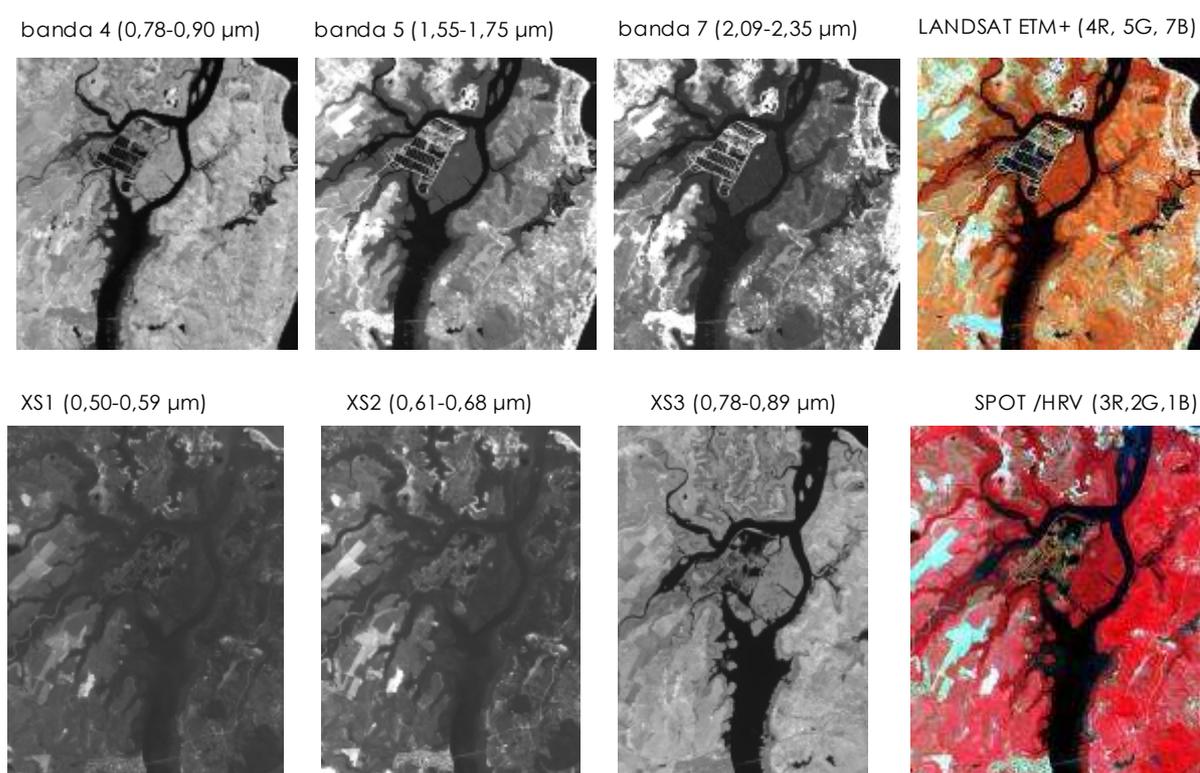


Figura 5 – Resultado da composição de bandas espectrais para os sensores ETM+ e HRV.

A qualidade da classificação supervisionada foi determinada pela proximidade das informações temáticas quando comparadas às informações da imagem original. A avaliação quantitativa da classificação foi obtida a partir da exatidão global, que representou um acordo de 97,38% e 98,56% entre os dados de referência e os classificados, para as imagens HRV e ETM+, respectivamente.

Como resultados, foram gerados as cartas imagens Landsat 7 e SPOT, com resoluções espaciais de 15 m e 10 m, respectivamente (Figura 6).

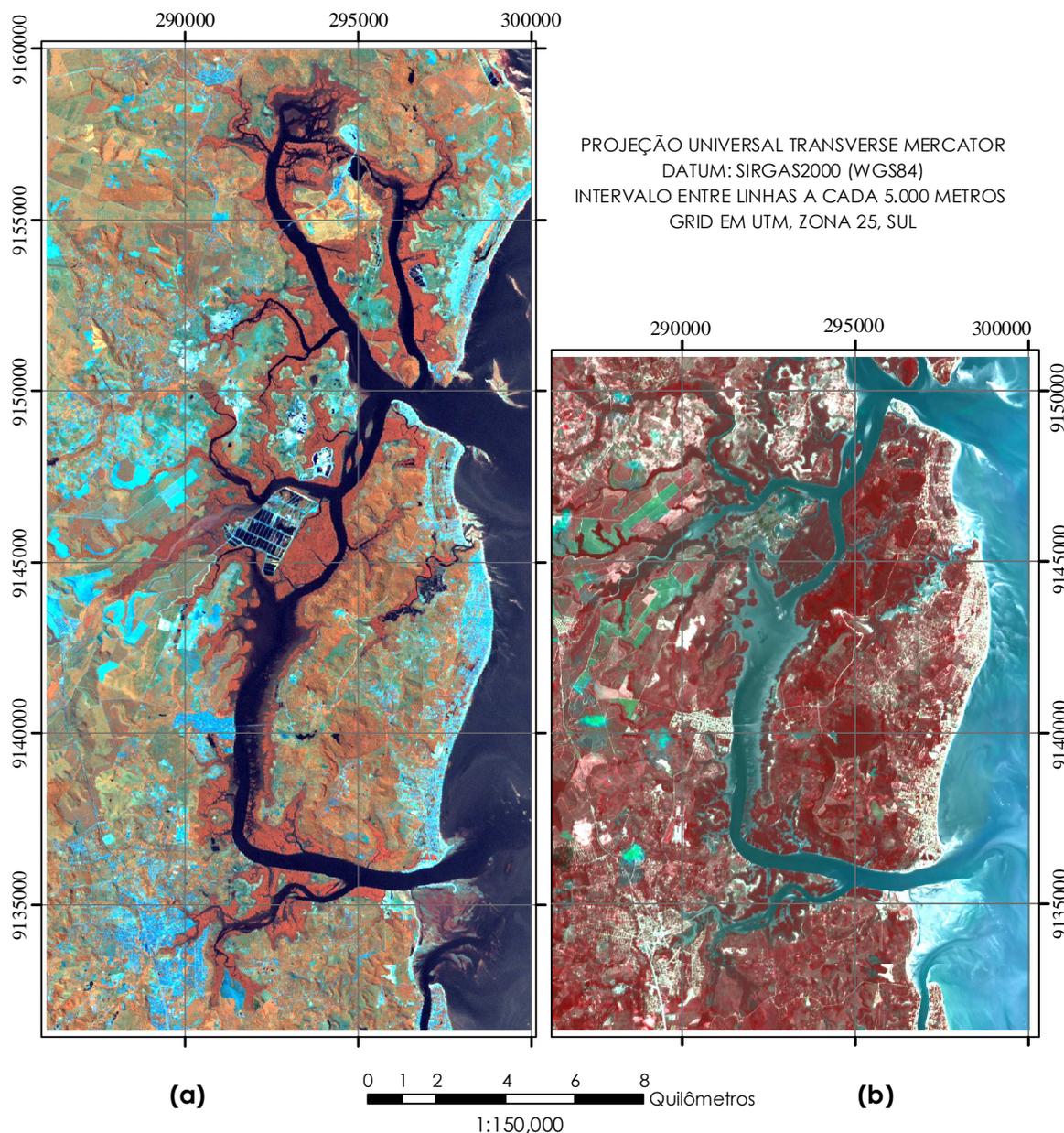


Figura 6 - (a) Carta imagem Landsat ETM+, 2001 (4R, 5G, 7B); **(b)** Carta imagem SPOT, 1996 (3R, 2G, 2B).

Em geral, como resultado do processo de classificação (Tabelas 2 e 3), as classes individuais apresentaram baixos erros de omissão e comissão para ambas as imagens e valores do estimador kappa próximos a 1. Como exemplo, a categoria floresta de mangue teve uma exatidão do produtor de 99,86% (SPOT) e 96,25% (ETM+) e erros de omissão 0,14% (2 de 1472 pixels para SPOT) e 0,16% (1 de 627 pixels para ETM+).

Tabela 2. Matriz de erro, exatidão global, erros de omissão e comissão, acurácia do produtor, acurácia do usuário e coeficiente kappa, resultante da classificação da imagem SPOT/HRV (1996) da zona costeira Itamaracá, Brasil.

DADO CLASSIFICADO	DADO DE REFERENCIA					ACURACIA DO USUARIO (%)	ERROS DE COMISSÃO (%)
	FLORESTA DE MANGUE	LAVADO	CORPO D'AGUA	OUTRAS CLASSES	TOTAL DE LINHAS		
FLORESTA DE MANGUE	1470	0	0	8	1478	99.46	0.54
LAVADO	0	458	172	0	630	72.70	27.30
CORPO D'AGUA	1	10	4086	0	4097	99.73	0.27
OUTRAS CLASSES	1	0	0	1137	1138	99.91	0.09
TOTAL DA COLUNA	1472	468	4 258	1145	7343		
ACURACIA DO PRODUTOR (%)	99.86	97.86	95.96	99.30			
ERROS DE OMISSÃO (%)	0.14	2.14	4.04	0.70			

Exatidão global = 97.38%; Coeficiente kappa = 0.95

Tabela 3. Matriz de erro, exatidão global, erros de omissão e comissão, acurácia do produtor, acurácia do usuário e coeficiente kappa, resultante da classificação da imagem Landsat ETM+ (2001) da zona costeira Itamaracá, Brasil.

DADO CLASSIFICADO	DADO DE REFERENCIA					ACURACIA DO USUARIO (%)	ERROS DE COMISSÃO (%)
	FLORESTA DE MANGUE	LAVADO	CORPO D'AGUA	OUTRAS CLASSES	TOTAL DA LINHA		
FLORESTA DE MANGUE	627	0	0	31	658	95.29	4.71
LAVADO	0	77	0	0	77	100	0
CORPO D'AGUA	0	3	1338	0	1341	99.78	0.22
OUTRAS CLASSES	1	0	9	975	985	98.98	1.02
TOTAL DA COLUNA	627	80	1347	1006	3061		
ACURACIA DO PRODUTOR (%)	99.84	96.25	99.33	96.92			
ERROS DE OMISSÃO (%)	0.16	3.75	0.67	3.08			

Exatidão global = 98.56%; Coeficiente kappa = 0.97

Os elevados valores de kappa, 97% (ETM+) e 95% (SPOT), próximos a 1, indica que as amostras obtidas para as categorias analisadas foram representativas no processo de classificação. Neste estudo, foram utilizadas apenas quatro classes que apresentam diferentes respostas espectrais, diminuindo, assim, a confusão entre os pixels, gerada durante o processo de classificação. A Figura 7 apresenta os mapas temáticos da distribuição espacial da floresta de mangue gerados a partir da classificação supervisionada, para as imagens ETM+ e HRV/SPOT. A partir deste mapeamento, foi possível realizar medições e obter informações quantitativas referentes às áreas de floresta de mangue, apicum, lavado e fazendas de camarão.

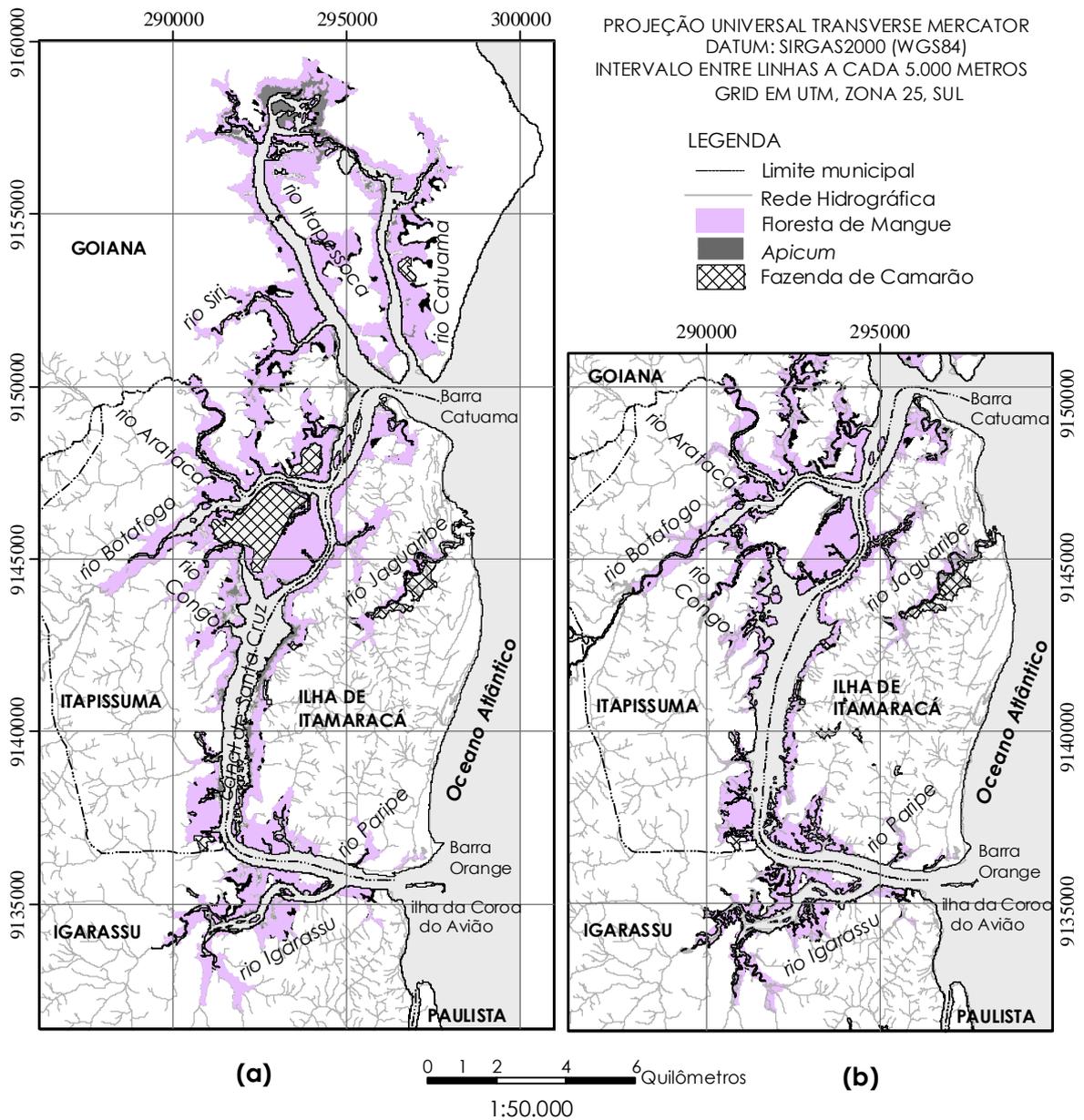


Figura 7 – Mapas temáticos da distribuição espacial dos manguezais: (a) Landsat 7 ETM+ (2001); (b) SPOT (1996).

DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS MANGUEZAIS EM 2001

As florestas de mangue do sistema de Itamaracá (incluindo os estuários do Canal de Santa Cruz - CSC e do rio Jaguaribe) totalizaram 4.118 ha, no ano de 2001. As áreas cobertas por manguezais totalizaram 4.515 ha, quando já incluídas as áreas de *apicum* (397 ha), referentes ao mesmo período. A análise espacial em ambiente SIG produziu novas informações, ao integrar os dados gráficos da distribuição dos manguezais e

de limite municipal, para gerar a distribuição espacial das categorias analisadas por município. A Figura 8 ilustra a representação gráfica da análise espacial.

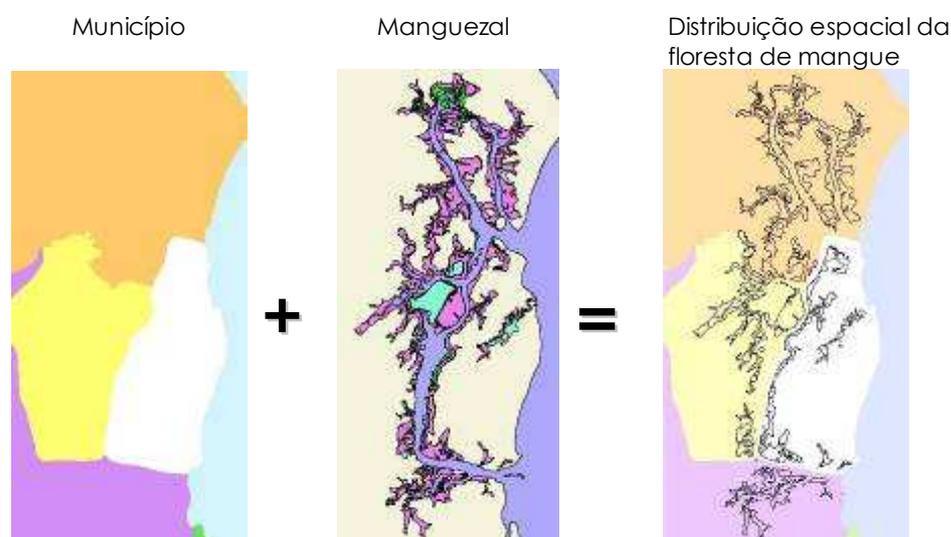


Figura 8 – Representação esquemática da análise espacial dos manguezais.

Os manguezais existentes nos municípios de Itamaracá, Goiana, Itapissuma e Igarassu (Tabela 4) representam 10,5% do total da área delimitada para este estudo (Figura 1). As áreas de florestas de mangue e de *apicum* distribuídas em todo o sistema estuarino do Canal de Santa Cruz, atingiram 4.036 ha e 391 ha, respectivamente. No estuário do rio Jaguaribe, os valores computados foram de 81 ha de floresta de mangue e 6 ha de área de *apicum*. Com base no resultado da classificação, em 2001, havia 484 ha de fazendas de camarão na área de estudo.

Tabela 4. Áreas dos manguezais e fazendas de camarão nos municípios de Itamaracá, Goiana, Itapissuma e Igarassu (2001).

MUNICÍPIO	FLORESTA DE MANGUE (ha)	APICUM (ha)	LAVADO (ha)	FAZENDA DE CAMARÃO (ha)
ITAMARACÁ	715,36	32,75	79,97	89,05
GOIANA	1982,77	262,14	276,34	70,80
ITAPISSUMA	975,54	49,66	68,88	321,41
IGARASSU	444,34	52,73	29,58	2,79

DISTRIBUIÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DOS MANGUEZAIS (1974 - 2001)

A análise temporal da distribuição espacial dos manguezais foi realizada para os anos 1974, 1996, e 2001, em 64% da área de estudo (Figura 1), em virtude da ausência de ortofotocartas ao norte da zona costeira de Itamaracá. Essa região está

situada entre as coordenadas UTM (SIRGAS) 9.151.000 N a 9.131.340 N e 276.000 E a 300.000E.

Para solucionar o problema das diferentes resoluções espaciais das imagens 1974, 1996 e 2001, os resultados da análise são apresentados em percentagens de áreas classificadas, com relação à área total de estudo.

A análise dos resultados mostra que houve uma redução nas áreas de floresta de mangue de 9,55% em 22 anos (1974 - 1996) e 1,67% em 5 anos (1996 - 2001), com taxas médias anuais de redução de 0,42% e 0,27%, respectivamente. Entre 1974 e 2001 houve uma redução na área de florestas de mangue equivalente a **11,06%**.

A distribuição espacial da floresta do mangue presente em Itamaracá, Itapissuma, Igarassu e parte de Goiana, em 1974, 1996 e 2001 (Tabela 5), indicou que a maior redução da vegetação, 26,69%, ocorreu em Igarassu (1974 - 2001), com uma taxa média anual de desmatamento de **1,06%**. Contudo, um pequeno aumento na área de floresta de mangue foi observado em Itamaracá (1996 - 2001), devido à regeneração natural da vegetação nas fazendas de camarão abandonadas e situadas no estuário do rio Jaguaribe (Moura, 2004).

Tabela 5. Área de floresta de mangue nos municípios (1974, 1996 e 2001).

MUNICIPIO	1974 (ORTOFOTOCARTA)	1996 (SPOT)	2001 (LANDSAT ETM+)
ITAMARACÁ	2.88%	2.57%	2.60%
GOIANA	1.49%	1.59%	1.66%
ITAPISSUMA	3.92%	3.83%	3.54%
IGARASSU	2.29%	1.58%	1.61%
TOTAL DA COLUNA	10.58%	9.57%	9.41%

A Tabela 6 apresenta dados populacionais e das áreas ocupadas por floresta de mangue e fazenda de camarão. De acordo com estudos desenvolvidos pela CPRH (2001), a maior parte da remoção de floresta de mangue ocorreu em virtude da expansão urbana, entre os anos de 1974 a 1996. Durante o período entre 1996 a 2001, os resultados do presente estudo revelam que o desflorestamento ocorreu principalmente para dar espaço à instalação de fazenda de camarão.

Tabela 6. Evolução da população e ocupação de floresta de mangue fazenda de camarão (1974, 1996 e 2001).

	1974	1996	2001
POPULAÇÃO (habitantes)	113.784	172.001	189.427
FLORESTA DE MANGUE (%)	10,58%	9,57%	9,41%
FAZENDA DE CAMARÃO (%)	0,34%	0,39%	1,68%

As áreas ocupadas por fazenda de camarão em 1974, 1996, e 2001 foram 0,34%, 0,39%, e 1,68%, respectivamente. O aumento da atividade de carcinicultura entre 1996 e 2001, motivada por benefício econômico, foi 331%. Esta atividade contribuiu para a supressão dos manguezais e foi precisamente computada a partir do sensoriamento remoto e SIG. A exemplo da fazenda camarão localizada ao Norte do sistema Itamaracá (Figura 9), nas margens do Canal de Santa Cruz, município de Goiana, que causou desmatamento de 2,4 ha de floresta de mangue e ocupou 9,1 ha de área de apicum (Moura,2004).

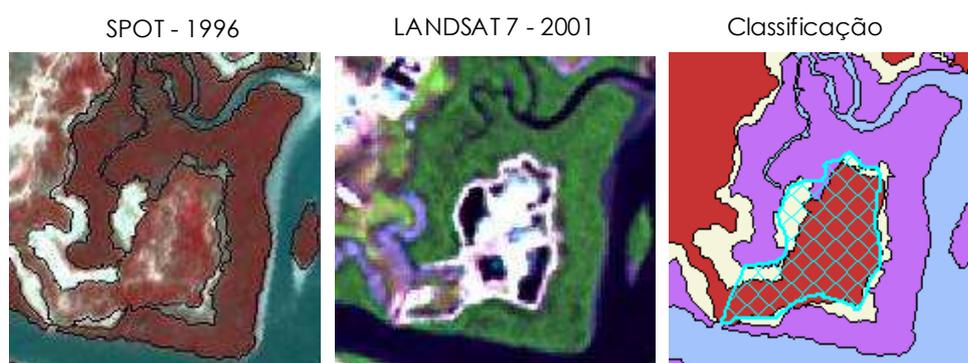


Figura 9 – Feições do ecossistema manguezal convertidas em fazenda de camarão.

A Figura 10 apresenta a distribuição espacial da floresta de mangue nos anos de 1974 e 2001. Os resultados comprovam o desflorestamento e, conseqüentemente, a geração de impactos negativos, que possivelmente interferiram na distribuição de sedimentos no CSC.

Levantamentos na literatura científica foram realizados com a finalidade de buscar estudos que corroborassem os resultados obtidos até o momento. Dois importantes estudos desenvolvidos no CSC foram selecionados; Lira (1975) e Silva (2004; 2005; 2008).

Lira (1975) caracterizou os sedimentos no CSC e identificou um padrão de deposição de areia média a grossa (0,25 - 0,5 a 0,5 - 1,0). Silva (2004; 2005; 2008) caracterizou e mapeou os sedimentos de fundo do Canal de Santa Cruz (Figura 11) e identificou mudanças no padrão de textura, em relação ao padrão encontrado por Lira (1975).

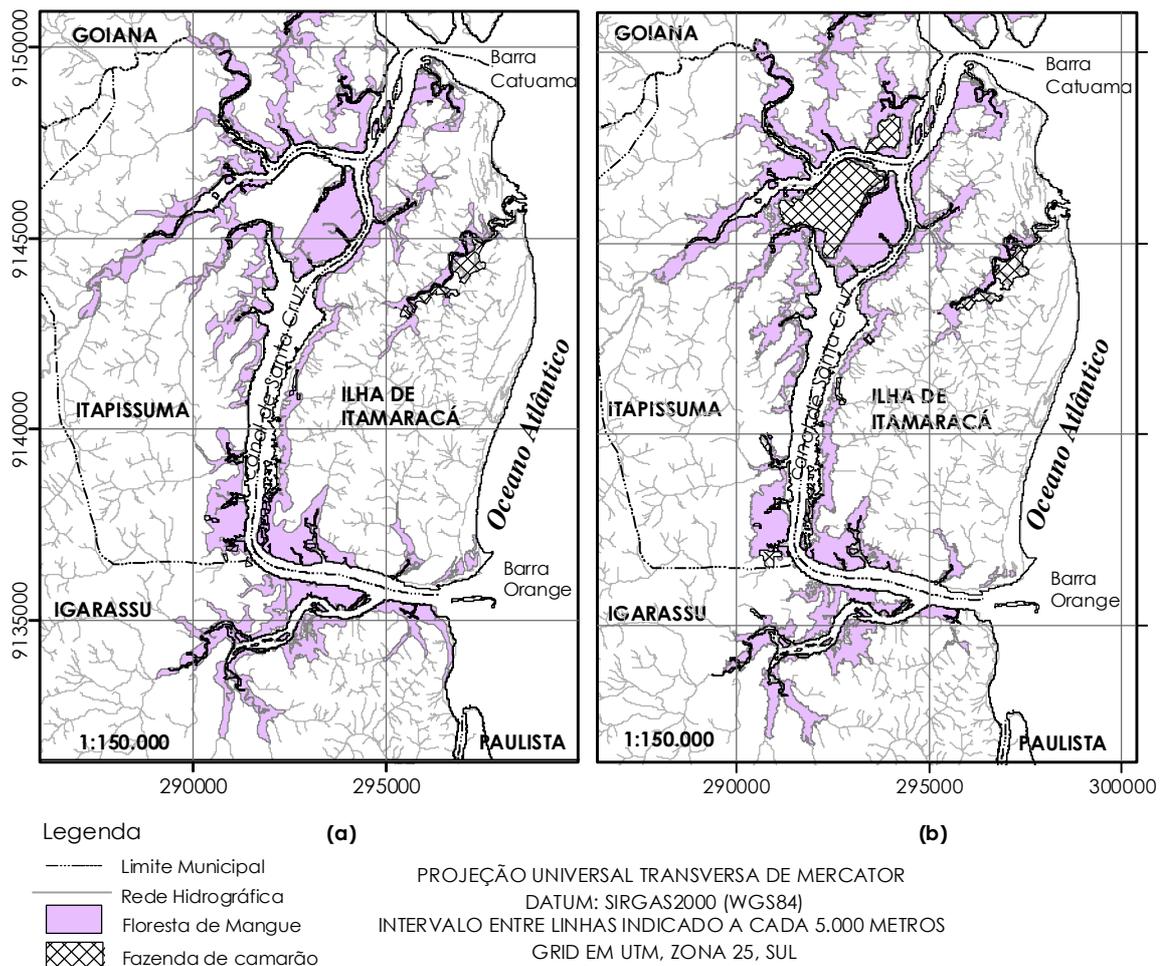


Figura 10 – Distribuição espacial de floresta de mangue e fazenda de camarão: **(a)** 1974. **(b)** 2001.

Usando estes estudos de forma comparativa, observou-se que a maior parte do depósito, que era constituída de areia média a grossa, hoje é encontrada areia fina a média (0,063 – 0,25 a 0,25 - 0,5). Por outro lado, nas áreas em que foi encontrada areia fina, seu correspondente foi areia siltica. Silva (2004; 2005; 2008) atribui as alterações na sedimentologia à devastação dos manguezais para implantação de fazendas de camarão. A vegetação de mangue retém os sedimentos mais finos por meio de suas raízes e, quando devastados, ocorre a erosão no solo em exposição e os sedimentos são carreados para o canal fluvial. Outro motivo para o desmatamento estaria relacionado à retirada de areia, das áreas que margeiam o canal, para uso na construção civil.

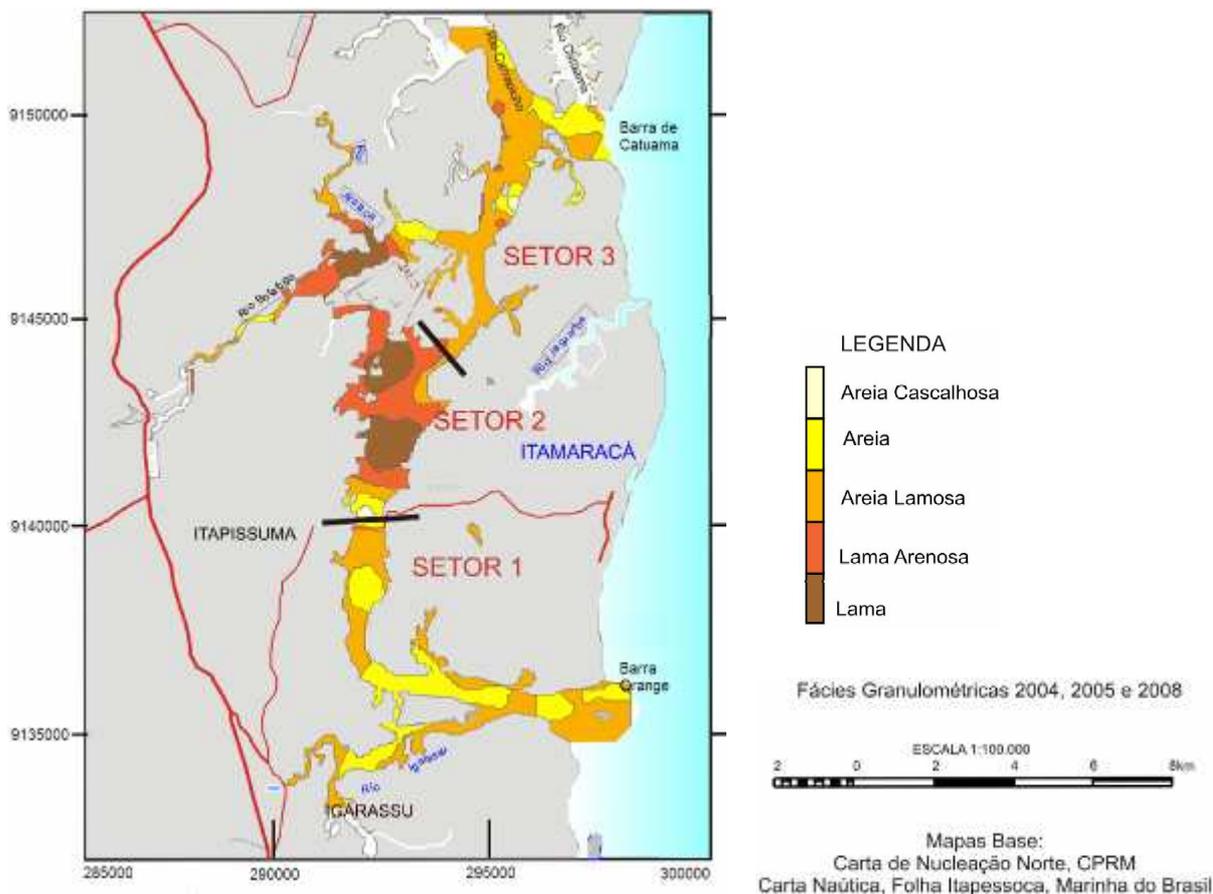


Figura 11 – Mapa de Fácies Granulométrica do Canal de Santa Cruz (Silva, 2004; 2005; 2008).

Este estudo comprovou que o uso do sensoriamento remoto e SIG são valiosas tecnologias para analisar espacialmente a distribuição dos manguezais e avaliar suas mudanças. Os resultados podem ser utilizados para auxiliar a aplicação da lei, orientar ações de gestão e planejamento, além de monitorar a conformidade com os acordos internacionais, como a Convenção de Ramsar (Seto & Fragkias, 2007).

CONCLUSÃO

A importância do ecossistema manguezal é legalmente reconhecida no Brasil, uma vez que são consideradas Áreas de Preservação Permanente (APP), protegidas por leis federais e estaduais. No entanto, observa-se no sistema estuarino de Itamaracá que as dificuldades de acesso a esse ambiente e as terminologias imprecisas constantes nas leis que protegem e regulam a sua utilização, causam conflitos de gestão e dificultam o monitoramento. Essas questões influíram diretamente na perda de 11% da vegetação de

mangue, num período de 27 anos (1974-2001). Nesse estudo, a atividade econômica de carcinicultura é apontada como um dos vetores responsáveis pelo desmatamento dos manguezais.

Os resultados da distribuição espacial dos manguezais nas imagens dos satélites Landsat ETM+ e SPOT/HTV, por meio da exatidão global da classificação e do coeficiente Kappa, indicaram um bom desempenho das técnicas de processamento de dados utilizados neste estudo.

A utilização de SIG tornou possível a manipulação das informações geradas por sensoriamento remoto (mapas temáticos) e a integração com os dados descritivos na mesma base de dados. O método proposto no presente estudo se mostrou eficiente para a identificação, mapeamento e análise espacial da distribuição dos manguezais. Também se mostrou adequado para quantificar alterações na vegetação de mangue; monitorar conformidades com os acordos ambientais internacionais, tais como as estabelecidas na Convenção Ramsar, em 1971, e gerar informações que possam ser utilizadas para a tomada de decisões no gerenciamento das zonas costeiras e dos manguezais.

REFERÊNCIAS

- BERLANGA-ROBLES, C.A. & RUIZ-LUNA, A., 2002. Land use mapping and change detection in the coastal zone of northwest Mexico using remote sensing techniques. *Journal of Coastal Research*, 18, 3, 514-522.
- BIGARELLA, J. J., 1947. Contribuição ao estudo de planície litorânea do Estado do Paraná. *B. Geog.*, v. 55, 747-779.
- BRASIL. Lei nº 4.771, de 15 de setembro de 1965. Institui o novo Código Florestal. Disponível em: <<http://www.planalto.gov.br/CCIVIL/LEIS/L4771.htm>>. Acesso em: 11 jun. 2009.
- BRASIL. Resolução CONAMA nº 303, de 20 de março de 2002. Dispõe sobre parâmetros, definições e limites de Áreas de Preservação Permanente. *Diário Oficial da União* nº 090, Brasília, 13 de maio de 2002, Seção I, p. 068.
- BRASIL. Resolução CONAMA nº 312, de 10 de outubro de 2002. Dispõe sobre o licenciamento ambiental dos empreendimentos de carcinicultura na zona costeira. *Diário Oficial da União* nº 203, Brasília, 18 de outubro de 2002, Seção I, pp. 60-61.
- BURROUGH, P. A. & MACDONNELL, R. A., 1998. *Principles of Geographical Information System: Spatial Information Systems and Geostatistics*. New York: Oxford University Press.
- BURROUGH, P. A., 1986. *Principles of Geographic Information Systems for Land resources Assessment*. Oxford University Press, 315p.
- CARVALHO, M. E. S., 2004. A carcinicultura na zona costeira do Estado de Sergipe. São Cristovão, 178 pp. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Núcleo de Pós-Graduação em Geografia. Universidade Federal de Sergipe, Brazil.
- CAVALCANTI, D.R., CARVALHO, E.V.T., ZAGAGLIA, C.R., BARRETO, R. & SANTOS, R.N.A., 2007. Detecção de viveiros de carcinicultura e de salinas com imagens CBERS-2 e Landsat, localizados na APA Delta do Parnaíba. *Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, 3813-3819.
- CLARK, J. R., 1995. Management Strategies. In: *Coastal Zone Management Handbook*. Lewis Publishers. 1-7.
- CONDEPE/FIDEM., 1978. *Mapeamento dos Recursos Hídricos Superficiais da Região Metropolitana do Recife*. Recife, PE, Brazil.
- CONGALTON, R. G., ODERWALD, R.G. & MEAD, R.G., 1983. Assessing Landsat classification accuracy using discrete multivariate statistical techniques. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 49,12, 1671-1678.
- CREPANI, E. & MEDEIROS, J. S., 2003. Carcinicultura em apicum no litoral do Piauí: uma análise com sensoriamento remoto e geoprocessamento. In: *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, XI, Belo Horizonte. *Anais*. 1541-1548. Repositório da UOLib: <<http://tid.inpe.br/sbsr/2002/11.13.17.36>>
- CPRH., 2001. Agência Pernambucana de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. *Diagnóstico Socioambiental do Litoral Norte de Pernambuco*. Recife-PE.
- D'ALGE, J.C.L., 2007. Cartografia para Geoprocessamento. In: *Introdução à ciência da Geoinformação*. INPE. Available <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/cap6-cartografia.pdf>> Access 14 out 2007.
- GIRI, C., PENGRA, B., ZHU, Z., SINGH A. & TIESZEN, L. L., 2007. Monitoring mangrove forest dynamics of the Sundarbans in Bangladesh and India using multi-temporal satellite data from 1973 to 2000. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 73, 91-100.

- GREEN, E. P., MUMBY, P. J., EDWARDS, A. J., CLARK, C. D. & ELLIS, A. C., 1997. Estimating leaf area index of mangroves from satellite data. *Aquatic Botany* 58, 11-19.
- IBGE., 2005. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Projeto Mudança do Referencial Geodésico - PMRG. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/pmrg/leg.shtm>>. Acesso em 01 set. 2007.
- JENSEN, J. R., 1996. *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*. 2d ed. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 318 pp.
- KEMPF, M. 1970. Nota preliminar sobre fundos costeiros da região de Itamaracá (Norte do estado de Pernambuco). *Trab Oceanogr. Univ. Fed. Pe.*, Recife, 9/11, p. 95-110.
- LILLESAND, T.M. & KIEFER, R.W., 1994. *Remote sensing and image interpretation*. 3 ed. New York: John Wiley, 750pp.
- LIRA, L., 1975. *Geologia do Canal de Santa Cruz e praia submarina adjacente a ilha de Itamaracá-PE*. Porto Alegre. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, UFRGS.107p.
- MACHADO, P. A. L., 1991. Manguezais e dunas: proteção legal. In: Agência Pernambucana de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. CPRH. Alternativas de uso e proteção dos manguezais do nordeste. Recife, 46-48. Publicações Técnicas, 3.
- MACIEL, N.C., 1991. Alguns aspectos da ecologia do manguezal. In: Agência Pernambucana de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. CPRH. Alternativas de uso e proteção dos manguezais do nordeste. Recife, 9-37. (Publicações Técnicas, 3).
- MARRONI, E.V. & ASMUS, M. L., 2005. *Gerenciamento Costeiro: uma proposta para o fortalecimento comunitário na gestão ambiental*. Pelotas: USEB, 149 pp.
- MEDEIROS, C. & KJERFVE, B., 1993. Hydrology of a tropical estuarine system: Itamaracá, Brazil. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 36, 495-515.
- MEDEIROS, C, KJERFVE, B., ARAÚJO, M. & NEUMANN, S., 2001. The Itamaracá Estuarine Ecosystem. Brazil In: *Coastal Marine Ecosystems of Latinamerica*. 1 ed. Berlin: Springer Verlag, v.1, pp. 71-81.
- MEYER, U., HAGEN, W. & MEDEIROS C., 1998. Mercury in a northeastern Brazilian mangrove area, a case study: potential of the mangrove oyster *Crassostrea rhizophorae* as bioindicator for mercury. *Marine Biology*, 131, 113-121.
- MMA., 2007. Ministério do Meio Ambiente. Available in: <<http://www.mma.gov.br/port/sqa/projeto/index.cfm> > Access in 20 mar 2007.
- MORAES, A.C.R., 1999. Contribuições para a Gestão da Zona Costeira do Brasil: Elementos para uma Geografia do Litoral Brasileiro. Ed. Hucitec Edusp, São Paulo, 229 pp.
- MOURA, A. R. L. U., 2004. Utilização das técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento como instrumentos para gestão ambiental das áreas estuarinas do Canal de Santa Cruz e rio Jaguaribe. Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco, PUBLIC2/FACEPE (n.23-CEN-08/00-01/01), 118 pp.
- MURRAY, M.R., ZISMAN, S.A., FURLEY, P.A., MUNRO, D.M., GIBSON, J., RATTER, J., BRIDGEWATER, S., MINTY, C.D. & PLACE C.J., 2003. The mangroves of Belize - Part 1. distribution, composition and classification. *Forest Ecology and Management* 174, 265-279.
- NASCIMENTO, S. A., 1993. Estudo da importância do apicum para o ecossistema manguezal. Relatório técnico. Sergipe: Governo do Estado do Sergipe, 30 pp.
- PACHÊCO, C. 2002. Manguezal. In: Parecer Ministério Público Federal:manguezal. Brasília.25p
- PERNAMBUCO. Resolução CONSEMA nº 002, de 15 de outubro de 2002. Regulamenta o licenciamento da atividade de carcinicultura na zona costeira do Estado de Pernambuco.

- PERNAMBUCO. PERH/PE, 1998. Plano Estadual de Recursos Hídricos: Documento Síntese. Secretaria de Recursos Hídricos, PROÁGUA Semi-Árido, Ministério do Meio Ambiente – Secretaria de Recursos Hídricos, Recife-PE, 215p.
- PONZONI, F. J. & ALMEIDA, E. S., 1996. A estimativa do parâmetro kappa (K) da análise multivariada discreta no contexto de um SIG. In: VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Salvador, Brasil, 14-19 abril 1996, INPE, p. 729-733.
- RAJITHA, K., MUKHERJEE, C.K. & VINU CHANDRAN, R., 2007. Applications of remote sensing and GIS for sustainable management of shrimp culture in India. *Aquacultural Engineering* 36, 1–17.
- RAMÍREZ-GARCÍA, P., LÓPEZ-BLANCO, J. & OCAÑA, D., 1998. Mangrove vegetation assessment in the Santiago River Mouth, Mexico, by means of supervised classification using Landsat TM imagery. *Forest Ecology and Management* 105, 217–229.
- RAMSAR CONVENTION., 1971. Available in: <<http://www.ramsar.org>>. Access in 18 set. 2007.
- SÁ, L. A. C. M. de., 2001. Modelagem de dados espaciais para sistemas de informações geográficas – pesquisa na emergência médica. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 87p.
- SCHAEFFER-NOVELLI, Y., 1999. Avaliação e ações prioritárias para a conservação de biodiversidade da zona costeira e marinha: grupo de ecossistemas, manguezal, marisma e apicum. Relatório de consultoria. São Paulo, 64 pp.
- SETO, K. C. & FRAGKIAS, M., 2007. Mangrove conversion and aquaculture development in Vietnam: A remote sensing-based approach for evaluating the Ramsar Convention on Wetlands. *Global Environmental Change* 17, 486–500.
- SILVA, L. A., 2004. Sedimentologia do Canal de Santa Cruz – ilha de Itamaracá-PE. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 97 p.
- SILVA, L. A., 2008. Estudos Geoambientais do Estuário do Canal de Santa Cruz – Itamaracá-PE. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Pernambuco. Recife.
- SILVA, J.D.V., 1995. Parâmetros Oceanográficos e distribuição das espécies e bosques de mangue do estuário do rio Paripe-PE. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil.
- SIQUEIRA FILHO, E. W., 1998. Mangues: importância e proteção jurídica. In: FREITAS, V. P. et al. *Direito ambiental em evolução*. Curitiba: Juruá, 390 pp, 49-73.
- TELLES, D. L., 2001. Inseticidas organoclorados e bifelinos policlorados (PCBs) na região estuarina de Itamaracá/PE: aspectos analíticos e ambientais. Recife: UFPE. Originalmente apresentada como tese de doutorado, Universidade Federal de Pernambuco, 2001.
- THAMPANYA, U., VERMAAT, J.E., SINSAKUL, S. & PANAPITUKKUL, N., 2006. Coastal erosion and mangrove progradation of Southern Thailand. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 68, 75-85.
- THU, P. M. & POPULUS, J., 2007. Status and changes of mangrove forest in Mekong Delta: Case study in Tra Vinh, Vietnam. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 71, 98-109.
- VALIELA, I., BOWEN, J. L. & YORK, J. K., 2001. Mangrove Forests: one of the world's threatened major tropical environments. *BioScience*, vol. 51, n. 10, 807-815.
- WANG, Y., BONYNGE, G., NUGRANAD, J., TRABER, M., NGUSARU, A.; TOBEY, J.; HALE, L.; BOWEN, R. & MAKOTA, V., 2003. Remote Sensing of Mangrove Change Along the Tanzania Coast. *Marine Geodesy*, 26, 35–48.
- WOSTEN, J.H.M., WILIGEN, P.D., TRI, N.H., LIEN, T.V. & SMITH, S.V., 2003. Nutrient dynamics in mangrove areas of the Red River Estuary in Vietnam. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 57, 65-72.

CAPÍTULO 5

CIRCULAÇÃO, PARÂMETROS TERMOHALINOS E EFEITO DE MOLHE HIDRÁULICO AO SUL DA ILHA DE ITAMARACÁ

RESUMO

Ao sul da ilha de Itamaracá, Região Nordeste do Brasil, pouco se conhece sobre a dinâmica que mantém esse segmento de costa em constante transformação e que influencia no transporte de sedimentos ao longo da costa de Itamaracá. A circulação superficial é a grande responsável pelo controle e distribuição das partículas mais finas e a caracterização de seu padrão poderá contribuir para identificar os processos que levaram ao surgimento de áreas mais susceptíveis à erosão, deposição e modificações na linha de costa. Problemas que vêm afetando essa região. Este estudo enfoca a variabilidade espaço-sazonal da circulação das águas superficiais no braço sul do Canal de Santa Cruz (CSC), além da distribuição espacial de parâmetros termohalinos e a presença de materiais em suspensão na água a partir do sinal de OBS (retroespalhamento ótico). Nessa etapa, foram utilizados os dados obtidos pelo perfilador CTD (*Conductivity-Temperature-Depth*) e correntômetro, ao longo de um ciclo completo de maré de sizígia. Posteriormente, foram obtidos dados ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*), com intuito de analisar a variabilidade horizontal e vertical do fluxo das águas e definir o padrão de circulação costeira e nas desembocaduras do CSC e do rio Timbó. Como resultados foram gerados mapas de intensidade e direção das correntes, à superfície, meia água e próximo ao fundo. Os maiores valores de intensidade de corrente ocorreu no estágio da vazante; apresentando uma média de $0,93 \text{ m s}^{-1}$, na desembocadura do CSC e, $0,68 \text{ m s}^{-1}$, no rio Timbó, respectivamente. A elevada vazão do CSC evidenciou a existência do “molhe hidráulico”, que se sobrepõe aos fluxos provenientes do rio Timbó e da deriva litorânea, gerando uma área propícia a deposição de sedimentos. A distribuição vertical obtida pelo ADCP permitiu verificar locais, ao longo da profundidade, em que a componente da corrente encontra-se invertida. Na análise sazonal, verificou-se que a variação espacial da temperatura ocorreu de acordo com o ritmo de intensidade solar. O estudo apresentou uma considerável variabilidade sazonal dos parâmetros termohalinos na camada superficial. No período seco foram obtidos valores médios de temperatura e salinidade de 30°C e 36, respectivamente. Já no período chuvoso, 27°C e 25, onde foram registrados maiores valores de OBS.

Palavras-chave: Hidrodinâmica. Circulação residual. Molhe hidráulico. ADCP. Itamaracá. Brasil.

INTRODUÇÃO

Na porção sul da ilha de Itamaracá, Nordeste do Brasil, a dinâmica costeira é influenciada por oscilações de maré, ação dos ventos, correntes costeiras e pelo aporte de água doce proveniente dos afluentes do Canal de Santa Cruz (CSC) e do rio Timbó, os quais mantêm este segmento em constante transformação. Essa complexa dinâmica, que envolve águas continentais e marinhas e influencia os processos de transporte e deposição de sedimentos ao longo da costa.

A posição no espaço geográfico da região de estudo lhe imprime um clima quente e úmido do tipo *Aws* (Köppen e elevadas temperaturas do ar (18-34 °C). Durante o período chuvoso (fevereiro-agosto), os ventos predominantes em Itamaracá são de direção SE, com uma velocidade média de 3,2 m s⁻¹ e alcançam valores máximos de 4,0 m s⁻¹, durante o mês de julho. No período seco (setembro-janeiro), prevalecem os ventos NE, com velocidade média 2,6 m s⁻¹. No entanto, no mês de dezembro prevalecem os ventos de E, com média de 2,0 m s⁻¹ (Medeiros, 1991).

Os ventos alísios de sudeste e as brisas marinhas exercem influência nas condições climáticas da área, em relação aos efeitos térmicos advindos da insolação. As precipitações dominantes (400 mm mês⁻¹) ocorrem de abril a junho (Passavante, 1981), com uma média mensal de 180-212 mm e um balanço hidrológico fortemente positivo. Contudo, no período seco a evaporação excede a precipitação de 40-51 mm mês⁻¹ e o balanço hidrológico é negativo (Medeiros & Kjerfve, 1993).

A presença de bancos de recifes algálicos, ao longo da costa de Itamaracá (Chaves, 1996, 2000), promove a refração e/ou reflexão das ondas, modificando o ângulo de incidência e atenuando sua energia ao chegarem à praia. A oscilação periódica do nível do mar nessa região possui uma variabilidade espaço-temporal de período e amplitude, que representam um dos fatores de grande modificação no processo de sedimentação do litoral, seja erodindo ou depositando (Martins, 1997).

Normalmente, a circulação residual no CSC se desloca em dois sentidos, a partir da ponte de Itapissuma: para o norte, em direção à Barra de Catuama e para o sul, em direção à Barra Orange. Todavia, mediante condições específicas durante as marés de sizígia e elevadas descargas de água doce (período chuvoso), por exemplo, a circulação ocorre em direção única em todo o CSC, seguindo para o Norte (Medeiros e Kjerfve, 2001).

A circulação superficial é um importante mecanismo de controle e distribuição de materiais em suspensão, que recobrem os fundos dos oceanos atuais (Tessler

& Mahiques, 2000), além de controlar o fluxo dos constituintes dissolvidos. A sedimentologia do CSC foi caracterizada por Silva (2004), que verificou dois padrões de deposição distintos: areias finas e médias no braço sul; e materiais lamosos no braço norte do canal.

A análise da hidrodinâmica em zonas costeiras é necessária, principalmente, para o entendimento dos processos de transporte de sedimentos. Este estudo apresenta como objetivos: **(a)** analisar, no braço sul do CSC, a variabilidade espaço-sazonal da circulação (correntômetro); dos parâmetros termohalinos e do comportamento da pluma de sedimentos a partir do retroespalhamento ótico (OBS), obtidos pelo perfilador CTD (*Conductivity-Temperature-Depth*); **(b)** analisar a variabilidade horizontal e vertical da circulação nas embocaduras do CSC e do rio Timbó, a partir de dados obtidos pelo perfilador ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*).

Estudos sobre a dinâmica sedimentar e hidrodinâmica na zona costeira de Itamaracá têm sido foco de vários pesquisadores (Leite *et al.*, 2008; Mesquita, 2003; Araújo *et al.*, 2000 a,b; Amaral *et al.*, 1989;). Contudo, pouco se conhece sobre a dinâmica que mantém esse segmento de costa em constantes transformações e que influencia o transporte e a deposição de sedimentos ao longo da costa de Itamaracá.

Constitui uma das motivações para o desenvolvimento deste estudo a comprovação científica da existência do “efeito de molhe hidráulico” na desembocadura sul do CSC. As alterações na efetividade do “efeito de molhe” (Komar, 1973) de embocaduras fluviais, em função de ação antrópica, caracterizam-se como uma das causas de ocorrência de erosão costeiras (Oliveira, 1999; Pitombeiras, 1996; Dominguez *et al.*, 1983).

METODOLOGIA

ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está limitada entre as coordenadas 7° 47' 35'' e 7° 51' 16'' de latitude sul e 34° 54' 25'' e 34° 48' 00'' de longitude oeste. Compreende parte de um sistema estuarino tropical, formado Canal de Santa Cruz (CSC), que se conecta por dois braços ao oceano Atlântico Sul. A região abrange parcialmente os municípios de Itamaracá, Igarassu e Paulista, bem como, as desembocaduras do braço sul do CSC e do rio Timbó, cuja vazão intensifica a hidrodinâmica costeira e dificulta a caracterização do padrão de circulação desse segmento.

A Figura 1(a) representa a localização da área de estudo e a posição espacial dos perfis e das estações de coleta de dados de temperatura, salinidade e OBS (CTD) e de intensidade e direção da corrente (correntômetro), nos períodos seco (janeiro/2007) e chuvoso (julho/2007). A Figura 1(b) indica a localização dos perfis, onde foram obtidos os dados de intensidade e direção de corrente (ADCP), durante o período chuvoso (maio/2007).

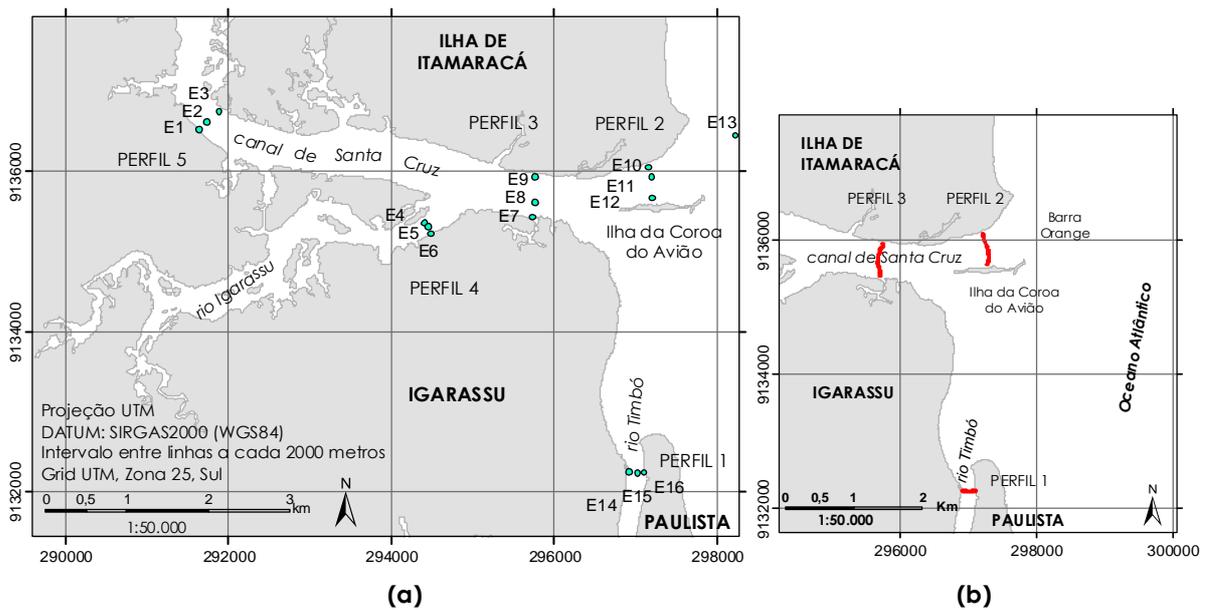


Figura 1 – Mapas de localização da área de estudo, indicando as estações de coleta e os perfis horizontais: **(a)** perfilador CTD e correntômetro; **(b)** perfilador ADCP.

O critério adotado para o traçado dos perfis se baseou em função do objetivo em determinar o padrão de circulação espacial no braço sul do CSC e na possibilidade da comprovação científica do “efeito de molhe hidráulico” gerado pela desembocadura Orange do CSC. Ao longo de cada perfil, foram estabelecidos três pontos de coleta de dados instantâneos, totalizando 16 pontos, em que foram utilizados o Correntômetro e o perfilador CTD.

O Perfil 1 se caracteriza por uma seção transversal de aproximadamente 200 m de extensão, posicionada próximo à desembocadura do rio Timbó, que liga os municípios de Igarassu a Paulista. O aporte das águas fluviais do rio Timbó contribui para a intensificação da hidrodinâmica no segmento de costa ente o rio e a Coroa do Avião.

O Perfil 2, localiza-se na desembocadura do braço sul do CSC e caracteriza-se por uma seção transversal com cerca de 550 m de extensão, que liga a ilha de Itamaracá, nas proximidades do Forte Orange, à ilha da Coroa do Avião.

O perfil 3, situa-se no CSC e liga os municípios de Itamaracá à Igarassu com uma extensão cerca de 500 m. O Perfil 4 está posicionado na desembocadura do rio Igarassu, com cerca de 200 m de extensão. Por fim, o Perfil 5, localizado a montante do braço sul do CSC, que liga os municípios de Igarassu à Itamaracá, com uma extensão aproximada de 350 m.

BASE DE DADOS

Os dados usados para análise sazonal no braço sul do CSC foram obtidos em duas campanhas oceanográficas realizadas em marés de sizígia, nos períodos seco (janeiro/2007) e chuvoso (julho/2007). Nessa etapa, foi utilizado o perfilador CTD *Sea Bird SBE19*, equipado com sensores para obtenção de temperatura, pressão e condutividade, em função da qual foram determinados os valores de salinidade. Acoplado ao CTD, um sensor de retroespalhamento ótico (OBS), cujo sinal está relacionado à presença de materiais em suspensão na água.

O levantamento dos parâmetros termohalinos e de OBS ocorreram nos estágios preamar, vazante, baixa-mar e enchente da maré, nas doze estações amostrais. Posteriormente, foram utilizadas rotinas de filtragem para eliminar valores espúrios e integrar os dados a cada 10 cm ao longo da coluna d'água. Em laboratório, foram utilizadas rotinas computacionais de filtragem para eliminar valores espúrios e integrar os dados a cada 10 cm, ao longo da coluna d'água.

Concomitantemente às medidas hidrológicas, foi realizado o levantamento hidrodinâmico, com uso de correntômetro *Sensordata SD30*, a partir de medições instantâneas de intensidade e direção da corrente, na superfície, a meia água e próximo ao fundo. As propriedades amostradas foram interpoladas, levando em conta a preocupação de considerar a caracterização e a representatividade dos pontos amostrais.

Levantamentos hidrodinâmicos também foram realizados no período chuvoso (maio/2007), com uso do perfilador ADCP *Rio Grande 600 kHz*, ao longo de perfis posicionados nas proximidades das desembocaduras do CSC e rio Timbó. Foi utilizado o recurso de *bottom tracking* (rasteio de fundo) para garantir a compensação da velocidade relativa entre o barco e o escoamento. No momento da medição foi fornecido, a partir de um *laptop* conectado ao ADCP, um tamanho para a "célula de profundidade" (*bins* ou *cells*) de 0,25 m, que é função da profundidade ao longo da coluna d'água (*esemble*), dos perfis amostrados.

As medições de intensidade e direção das correntes e o cálculo da vazão das seções transversais foram executados nos quatro estágios de maré, além do levantamento batimétrico ao longo da extensão de cada seção transversal.

Na etapa de processamento de dados foi utilizado um conjunto de rotinas computacionais, com a finalidade de gerar planilhas com valores adequados para representar graficamente os dados espaciais (representação vertical e horizontal) sobre a base cartográfica da área de estudo. Para tanto, a cada nove registros do ADCP, foi calculada uma média dos valores de intensidade e posicionado o *stick* na mediana, para a representação gráfica horizontal da intensidade e direção das correntes.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

VARIABILIDADE ESPAÇO-SAZONAL DOS PARÂMETROS TERMOHALINOS E MATERIAIS EM SUSPENSÃO

Apesar da pequena quantidade de estações amostrais estabelecidas no braço sul do CSC, foi utilizado o método determinístico de interpolação do Inverso do Quadrado da Distância (IDW), com a finalidade de caracterizar o padrão de distribuição da temperatura, salinidade e retroespalhamento ótico (OBS).

Os valores interpolados de temperatura, salinidade e OBS, obtidos a partir do perfilador CTD durante o período seco, são apresentados nas Figuras 2 e 3, para os estágios de preamar, vazante, baixa-mar e enchente.

Em janeiro de 2007, a precipitação mensal foi 43 mm na microrregião de Itamaracá e as águas superficiais do braço sul do CSC, apresentaram uma variação de temperatura entre 29,16°C e 30,62°C, ao longo do ciclo total da maré. Os valores mais elevados foram observados no final do ciclo e atribuídos à variabilidade nictemeral. Essa pequena variação de temperatura, que ocorre de acordo com o ritmo de intensidade solar, normalmente é observada em estuários tropicais como o do CSC (Melo *et al.*, 2008; Galdino, 2004).

A salinidade à superfície do CSC variou entre 34 e 36,97 ao longo do ciclo da maré e se manteve no padrão oceânico (média 36,6), no estágio de preamar. Durante a baixa-mar, a salinidade apresentou menores valores (média 34,7) e a tendência a se manter constante no sentido longitudinal do canal.

A presença de materiais em suspensão na camada superficial da água pode ser confirmada pelos valores do sinal de OBS, que apresentou uma variação entre 10 e 35,16, durante o período amostrado. Os maiores valores de OBS foram observados durante o estágio de vazante, em virtude do maior aporte das águas fluviais.

Com base no resultado das medições *in situ*, referentes às campanhas de janeiro e julho de 2007, verificou-se que os parâmetros analisados à superfície da água no período chuvoso, ilustrado nas Figuras 4 e 5, comportaram-se de maneira semelhante aos encontrados no período seco. Com pequenas variações dos parâmetros durante os ciclos amostrados. Contudo, foi observada uma variabilidade sazonal em virtude do aumento da precipitação pluviométrica e conseqüente aumento da descarga de água doce.

A tomada dos dados ocorreu em um dia chuvoso e a precipitação registrada durante o mês de julho foi 167 mm na estação Igarassu; 169 mm na estação Itamaracá e 160 mm na estação Itapissuma (LAMEPE, 2009). A Figura 6 apresenta um hietograma das precipitações mensais nas estações de Igarassu, Itamaracá e Itapissuma, referentes ao ano de 2007, em que foram realizadas as coletas de dados oceanográficos. O pico do período chuvoso, em 2007, ocorreu no mês de Junho.

Durante todo o ciclo amostrado em julho/2007, a temperatura à superfície da água variou entre 26°C e 27,4°C, com valores menores na desembocadura do canal. Os valores mais elevados foram observados no final do ciclo, sendo atribuídos à variabilidade nictemeral. A temperatura apresentou uma variação sazonal em relação à distribuição espacial na camada superficial, com médias de 30°C e 26,7°C para os períodos seco e chuvoso, respectivamente.

A salinidade apresentou variabilidade espacial entre 16 e 34, com valores menores que no período seco, decorrente do aumento da precipitação e maior aporte das águas fluviais. Os menores valores de salinidade foram registrados na desembocadura do rio Igarassu (Perfil 4), durante a baixa-mar.

Os valores de OBS apresentaram uma variação entre 28 e 88. Foi observada maior presença de materiais em suspensão durante a preamar, confirmada com o aumento do sinal de OBS.

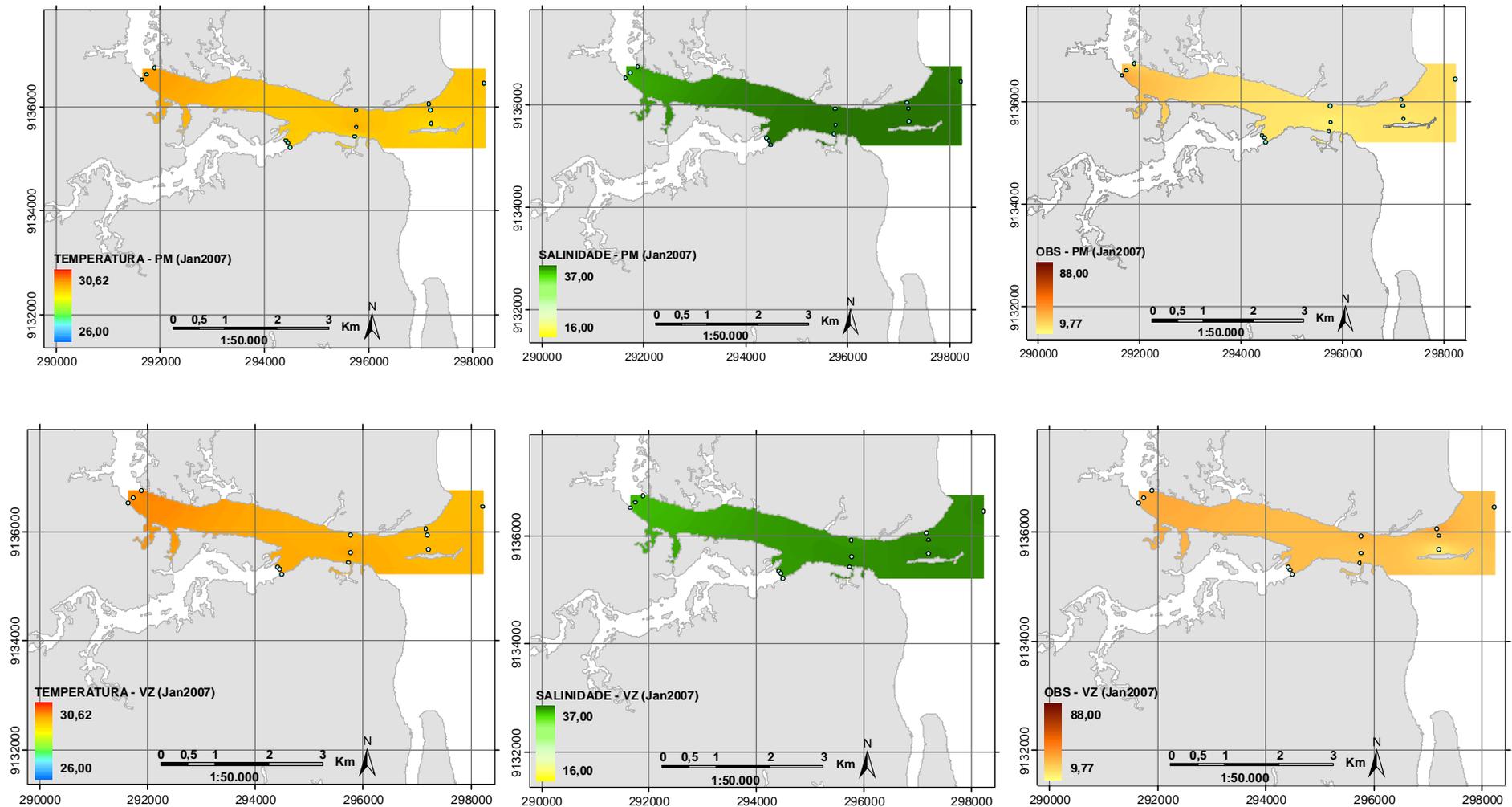


Figura 2 – Período seco (janeiro/2007). Distribuição espacial da temperatura, salinidade e OBS, nos estágios de preamar (PM) e vazante (VZ).

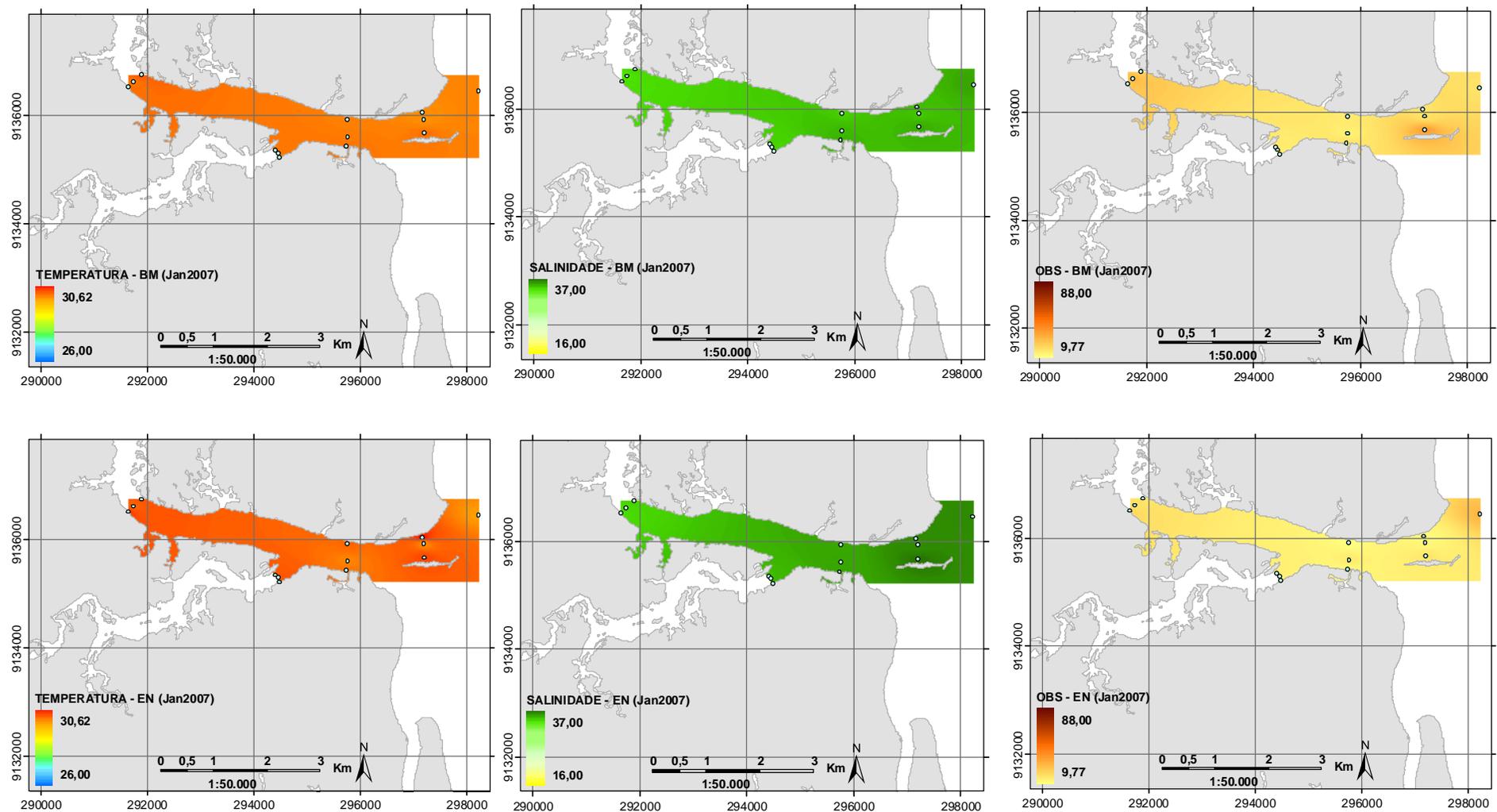


Figura 3 - Período seco (janeiro/2007). Distribuição espacial da temperatura, salinidade e OBS, nos estágios de baixa-mar (BM) e enchente (EN).

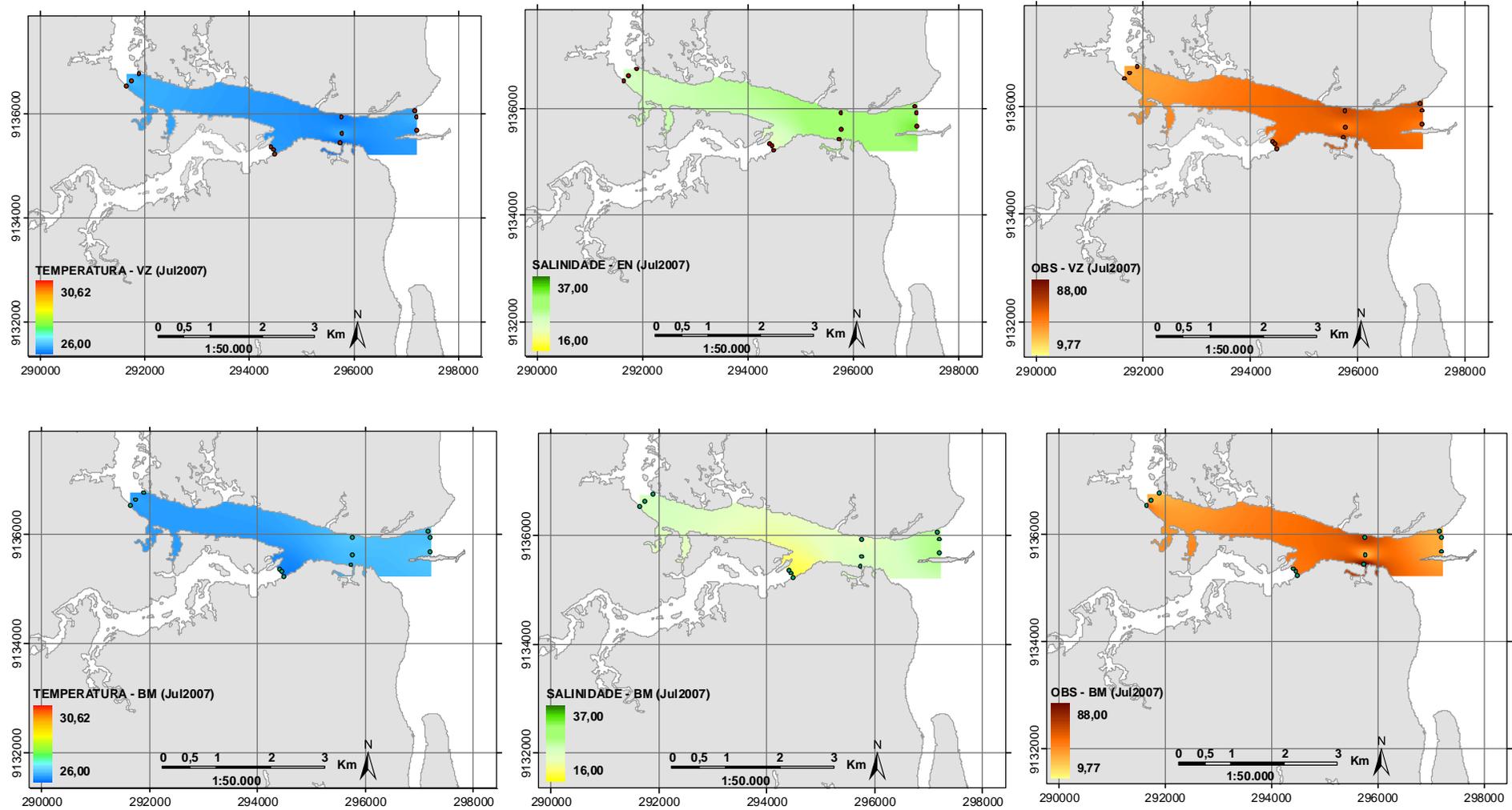


Figura 4 – Período chuvoso (julho/2007). Distribuição espacial da temperatura, salinidade e OBS, nos estágios de vazante (VZ) e baixa-mar (BM).

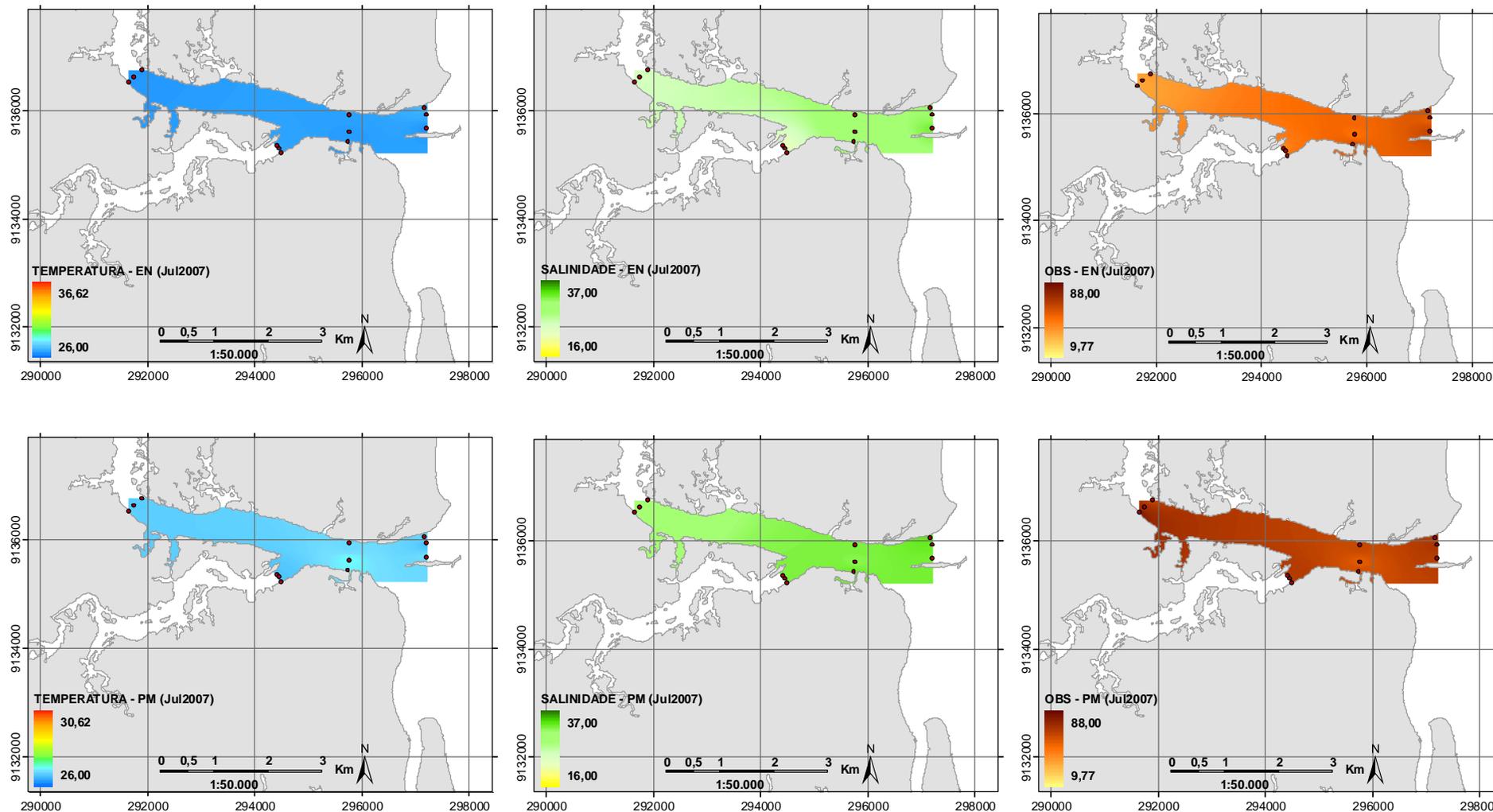


Figura 5 - Período chuvoso (julho/2007). Distribuição espacial da temperatura, salinidade e OBS, nos estágios de enchente (EN) e preamar (PM).

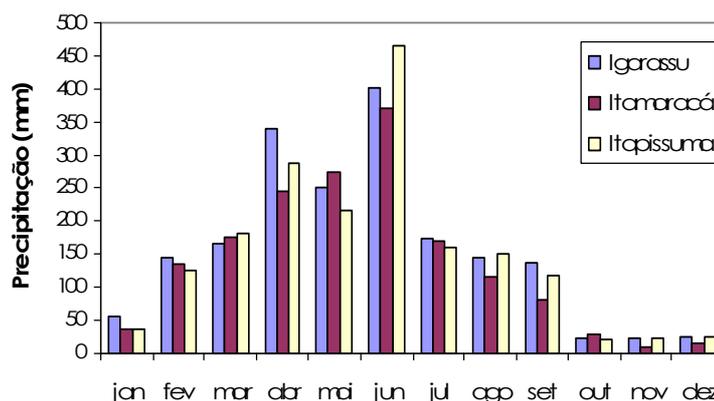


Figura 6 – Hietograma das precipitações mensais para o ano de 2007, nas estações de Igarassu, Itamaracá e Itapissuma.

Em ambos os períodos, seco e chuvoso, não foi observada estratificação térmica. A temperatura permaneceu constante ao longo da coluna d'água, em todas as estações amostrais.

Foi realizada uma classificação de acordo com a estratificação de salinidade, utilizando o método proposto por Hansen & Rattray, 1966 (Miranda *et al.*, 2002). O parâmetro de estratificação vertical na coluna d'água foi definido pela razão adimensional:

$$\frac{\delta S}{\bar{S}} \quad (1)$$

onde: δS é diferença entre os valores estacionários das salinidades de fundo e de superfície e \bar{S} é valor estacionário da salinidade média na coluna d'água.

De acordo com os autores citados, os resultados obtidos indicaram uma tendência do parâmetro de estratificação de se aproximar de zero, durante o período seco, em todos os pontos amostrais. Dessa forma, o estuário do braço sul do CSC foi classificado como "verticalmente homogêneo". Durante o período chuvoso, o parâmetro de estratificação variou entre 10^{-1} e 10^{-5} , sendo classificado, portanto, como um estuário "fracamente estratificado". Isso indica que, possivelmente, a precipitação exerce pouca influência sobre a estratificação da salinidade.

Prandle (1985), com o propósito de estabelecer um diagrama de classificação baseado em critérios de estratificação, determinou uma correlação a partir de dados experimentais de estuários naturais e de modelos físicos. A correlação entre o

parâmetro de estratificação de Hansen & Rattray (1966) e os correspondentes valores de número de estratificação, S_t (Miranda *et al.*, 2002), é denotado por:

$$\frac{\delta S}{S} = 4S_t^{-0,55} \quad (2)$$

De acordo com a Equação 2 de Prandle (1985), os resultados indicaram, para ambos os períodos, valores de $S_t > 400$, em todas as estações amostrais. Portanto, o braço sul do CSC foi classificado como um estuário “bem misturado”, durante os períodos seco e chuvoso.

A Resolução CONAMA Nº 375/2005, que dispõe sobre a classificação dos corpos d'água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, estabelece definições em função da salinidade (S) das águas: $S < 0,5$ classifica as águas doces, $0,5 < S < 30$ como águas salobras e $S \geq 30$ em águas salinas.

De acordo com a classificação estabelecida pelo CONAMA Nº 375/2005, a salinidade média no braço sul do CSC, durante o período seco, foi 35,5 (águas salinas). Essa hipersalinização é atribuída ao balanço hídrico negativo decorrente da elevada evaporação das águas e evapotranspiração dos manguezais (Medeiros & Kjerfve, 1993). Durante o período chuvoso, a salinidade média foi 25 (águas salobras), indicando características de águas estuarinas.

Os resultados da análise espacial e sazonal dos parâmetros termohalinos indicaram que a circulação no braço sul do CSC é, predominantemente, dominada pela forçante da maré. O movimento das correntes de maré nas proximidades do fundo se caracteriza como o mais importante componente de mistura vertical na coluna d'água.

VARIABILIDADE ESPAÇO-SAZONAL DA CIRCULAÇÃO A PARTIR DE DADOS DO CORRENTÔMETRO SENSOR DATA SD30

Os valores de intensidade e direção das correntes, obtidos nos estágios de preamar, vazante, baixa-mar e enchente da maré de sizígia, relativo aos períodos seco e chuvoso, estão representados graficamente nas Figuras 7 e 8.

Durante o período seco, a intensidade da corrente superficial (Figura 7) no braço sul do CSC apresentou uma variação de 0 a 0,61 m s⁻¹, ao longo do ciclo da maré. Os

maiores valores foram obtidos durante a vazante, no Perfil 2, que liga o Forte Orange a Coroa do Avião: E10 ($59,6 \text{ m s}^{-1}$), E11 ($0,55 \text{ m s}^{-1}$), E12 ($0,61 \text{ m s}^{-1}$).

As maiores intensidades das correntes foram observadas durante o período chuvoso. Os valores na camada superficial variaram entre 0 a $0,77 \text{ m s}^{-1}$, ao longo do ciclo completo da maré. Foi verificado o mesmo padrão observado no período seco, com os valores de intensidade maiores nas proximidades do Forte Orange - E10 ($0,60 \text{ m s}^{-1}$) e Coroa do Avião - E12 ($0,73 \text{ m s}^{-1}$) e menores no centro do canal - E11 ($0,59 \text{ m s}^{-1}$), na vazante.

Em ambos os períodos a circulação próxima ao fundo apresentou o mesmo padrão de comportamento que na camada superficial, porém com valores de intensidade da corrente menores, em virtude da tensão de cisalhamento.

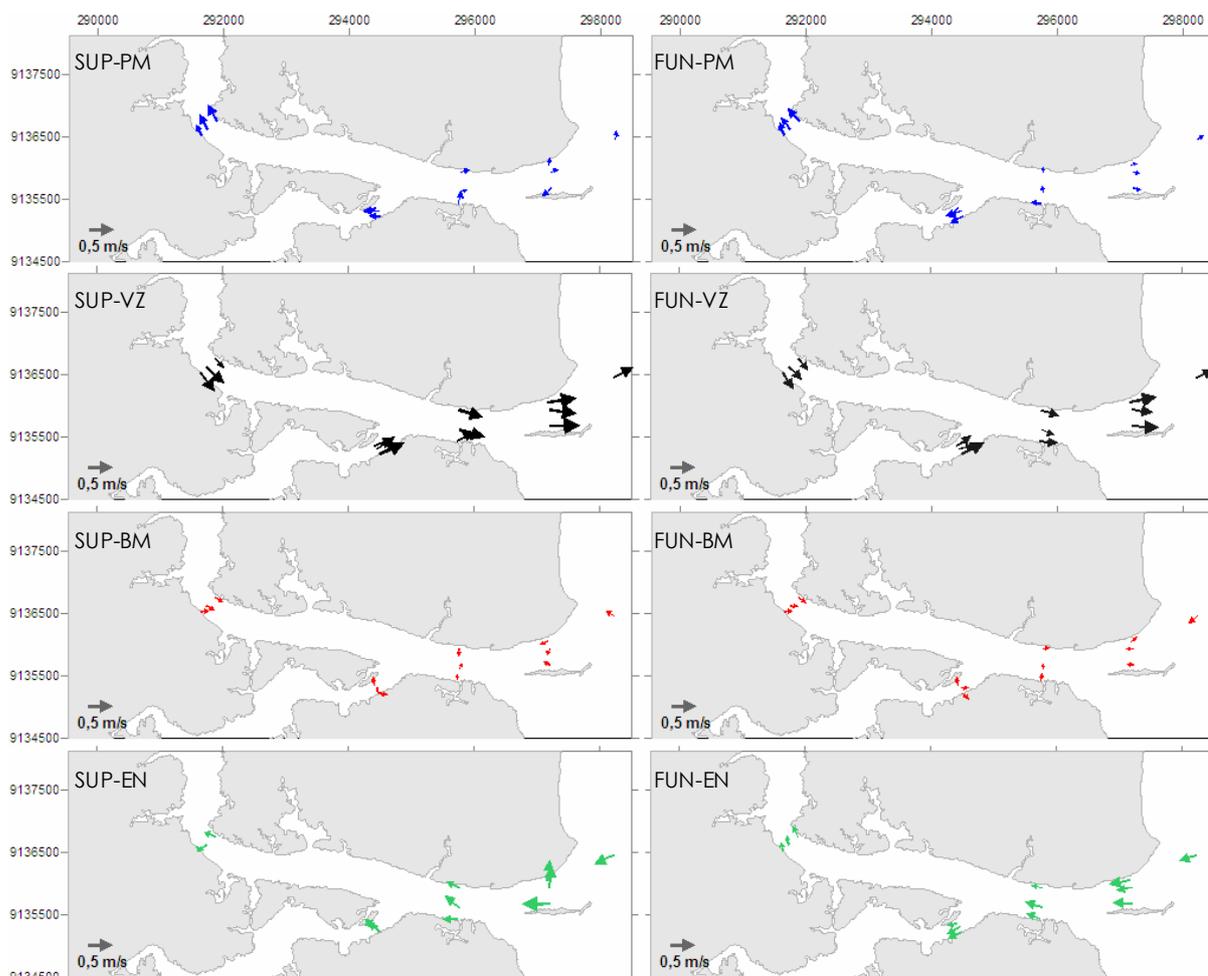


Figura 7 – Período seco. Representação esquemática da intensidade e direção das correntes na superfície (SUP) e próximo ao fundo (FUN), nos quatro estágios da maré.

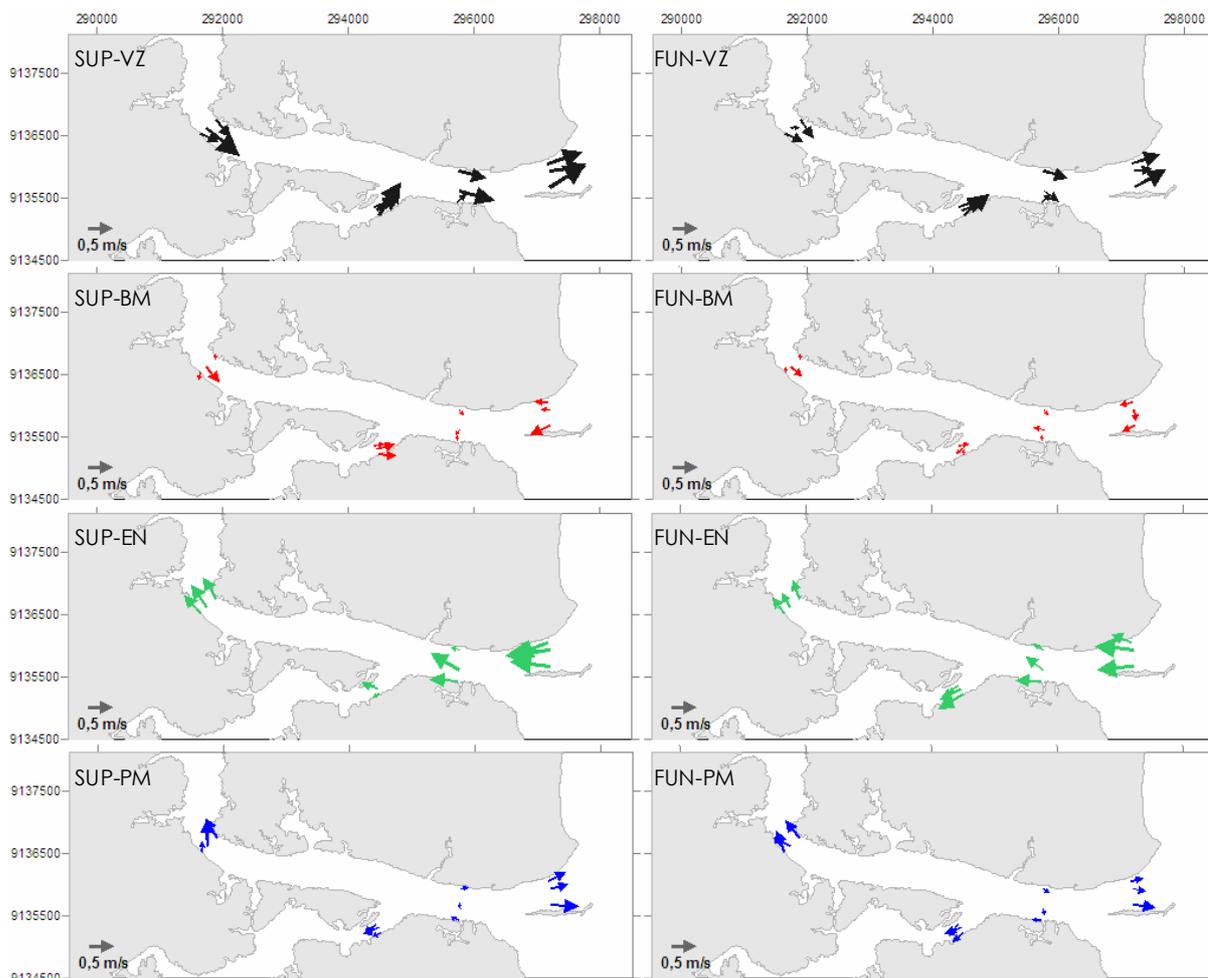


Figura 8 – Período chuvoso. Representação esquemática da intensidade e direção das correntes na superfície (SUP) e próximo ao fundo (FUN), nos quatro estágios da maré.

VARIABILIDADE HORIZONTAL E VERTICAL DA CIRCULAÇÃO A PARTIR DE DADOS ADCP

A caracterização do padrão de circulação horizontal foi representada graficamente sobre uma base cartográfica, ilustrada nas Figuras 9 e 10. A distribuição horizontal da intensidade e direção das correntes (ADCP) à superfície, à meia água e próximo ao fundo, foram analisadas para os estágios de preamar, vazante, baixa-mar e enchente da maré.

O levantamento dos dados ocorreu no período chuvoso (maio/ 2007), onde foram registradas precipitações de 252 mm na estação pluviométrica de Igarassu; 275 mm na estação Itamaracá; 216 mm na estação Itapissuma (LAMEPE, 2009). Observa-se que no mês de maio/2007 a precipitação excedeu em 67%, em relação ao mês de Julho/2007, na microrregião de Itamaracá.

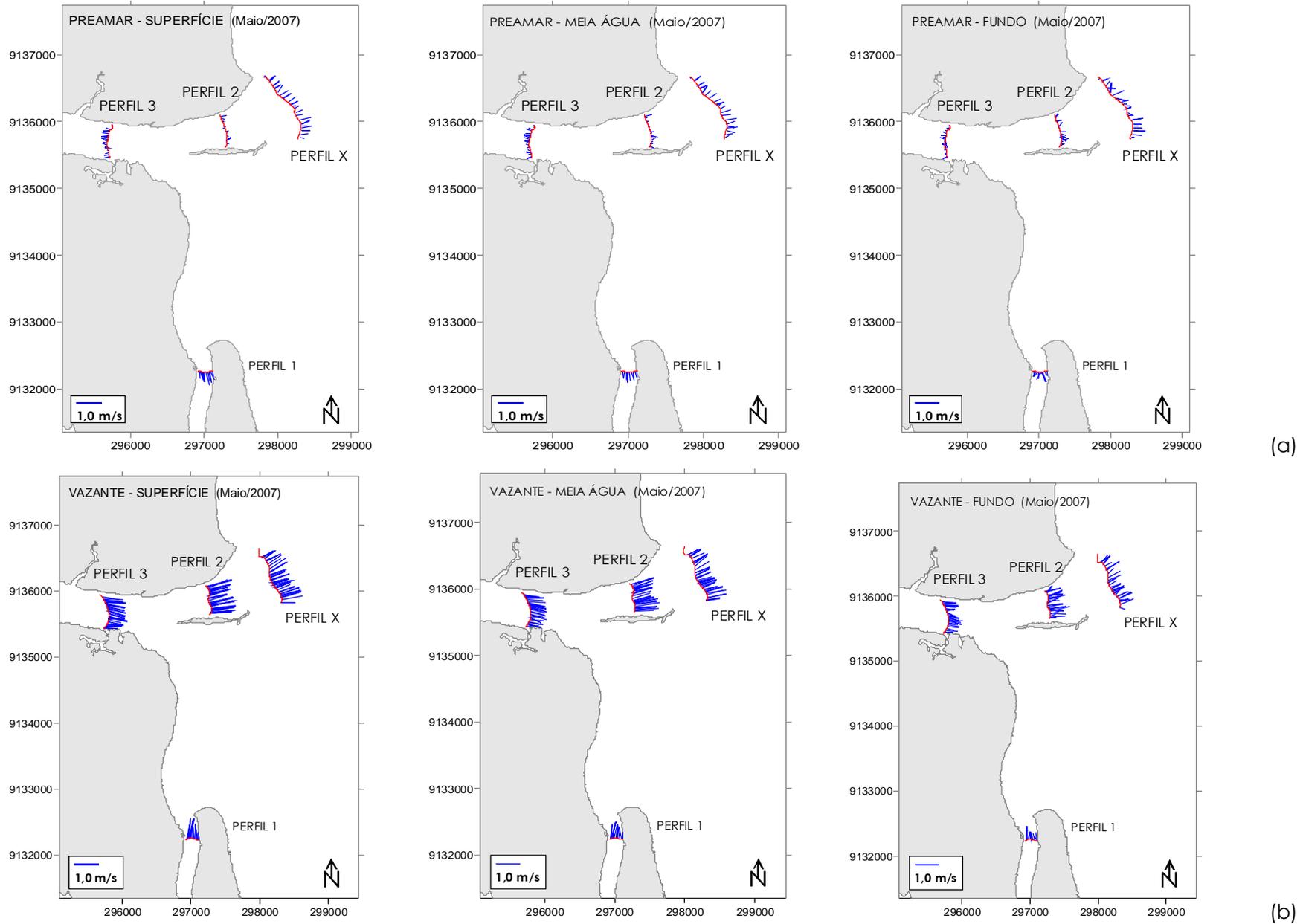


Figura 9 - Distribuição horizontal da intensidade e direção da corrente (ADCP): na superfície, a meia água e no fundo. **(a)** Preamar; **(b)** Vazante.

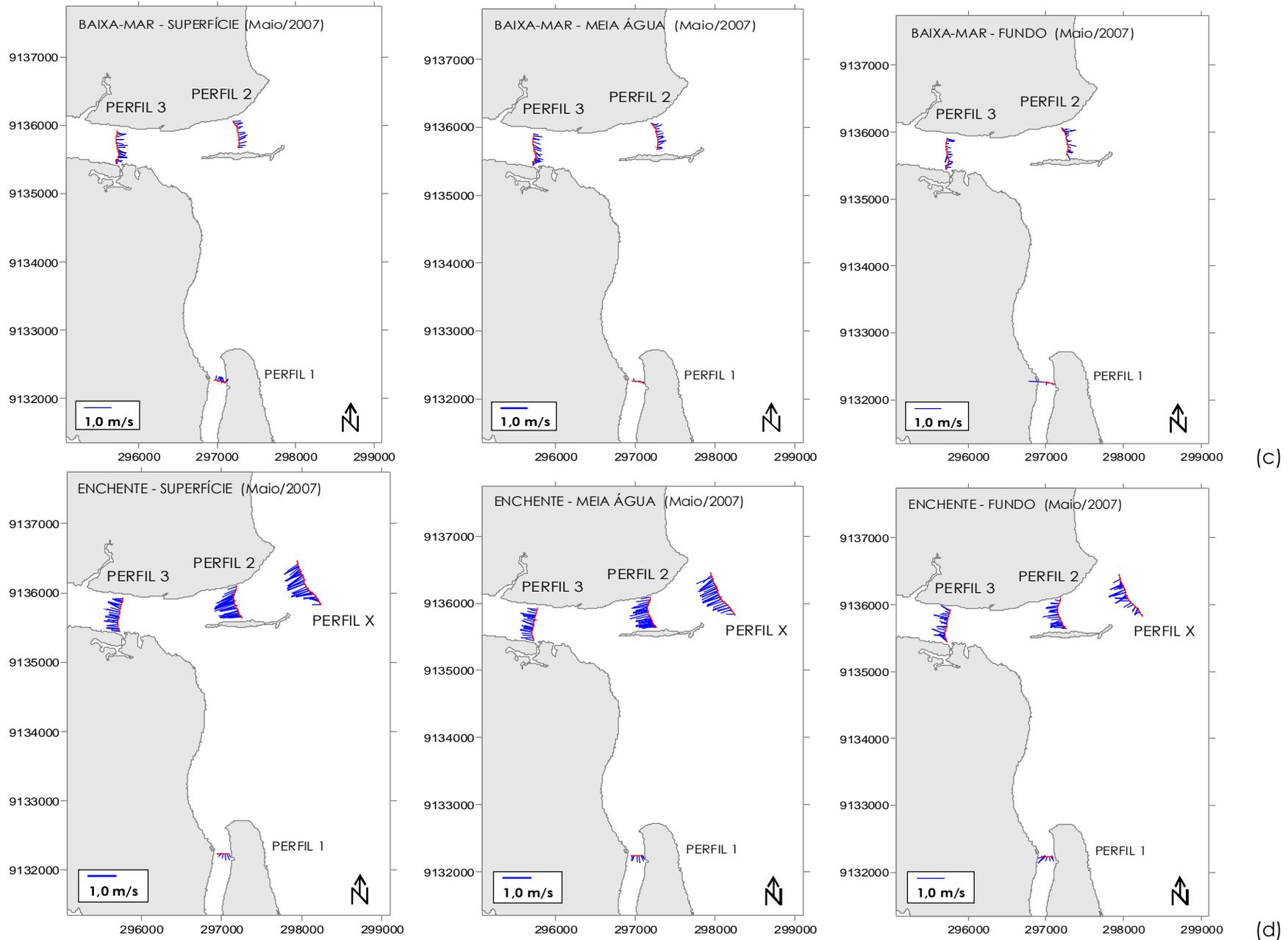


Figura 10 – Distribuição horizontal da intensidade e direção da corrente (ADCP): na superfície, a meia água e no fundo. (c) Baixa-mar; (d) Enchente.

Durante a preamar, a circulação no Perfil 3 seguiu a montante, indicando uma influência maior da forçante da maré, onde a intensidade média da corrente foi $0,18 \text{ m s}^{-1}$ (superfície) e $0,13 \text{ m s}^{-1}$ (próximo ao fundo). No estágio da vazante ocorreram as maiores intensidades de todo o ciclo, apresentando fluxo das águas seguindo a jusante e intensidades médias das correntes de $0,73 \text{ m s}^{-1}$ (superfície) e $0,46 \text{ m s}^{-1}$ (fundo). Já durante a enchente, foram obtidas médias de $0,40 \text{ m s}^{-1}$ e $0,31 \text{ m s}^{-1}$, respectivamente, na superfície e fundo.

No Perfil 2 foram observados na camada superficial os menores valores de intensidade da corrente (próximos a zero), durante a preamar. É possível observar que na preamar o Perfil 2 é a seção na qual ocorreu a inversão da circulação, no instante da medição, uma vez em que o Perfil X (posicionado à costa) indica que a circulação segue a jusante, no momento em que no Perfil 3 seguia a montante. Já nas proximidades do fundo, observa-se direção bem definida seguindo a jusante e valores de intensidade média maiores ($0,21 \text{ m s}^{-1}$) que na superfície ($0,15 \text{ m s}^{-1}$). Durante a baixa-mar, constata-se que a influência da vazão de água doce ($507 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) é maior que as forçantes de maré, e apresenta intensidade média na superfície de $0,25 \text{ m s}^{-1}$ e $0,21 \text{ m s}^{-1}$ próximo ao fundo. As maiores intensidades ocorreram durante a vazante, com valores médios de $0,92 \text{ m s}^{-1}$ (superfície) e $0,58 \text{ m s}^{-1}$ (fundo).

O padrão de circulação das águas que passam na seção do rio Timbó, Perfil 1, seguiu em direção a montante, na preamar, indicando que a forçante da maré ($515 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) prevaleceu sobre a descarga do rio. Durante a baixa-mar, predominou a circulação a jusante, apesar da reduzida vazão ($76 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) em relação à obtida na preamar. Os maiores valores de intensidade média ocorreram nos estágios de vazante, sendo $0,68 \text{ m s}^{-1}$ na superfície e $0,38 \text{ m s}^{-1}$ no fundo.

Durante a preamar, foi considerada uma extensão de 200 m a partir da costa, no município de Paulista, em direção ao oceano, para avaliar a influência da deriva litorânea. Foram obtidos valores de intensidade média de $0,17 \text{ m s}^{-1}$ na superfície e $0,10 \text{ m s}^{-1}$ no fundo, seguindo em direção ao norte.

A distribuição vertical da componente u (zonal) do vetor corrente, para o Perfil 1 (rio Timbó) e da componente v (meridional) para os Perfis 2 e 3 (CSC), encontram-se plotadas nas Figuras 11 a 14, referentes aos estágios de preamar, vazante, baixa-mar e enchente. A palheta de cores foi construída de forma a tentar visualizar graficamente a variação da componente da corrente, em relação à magnitude e à direção e sentido que elas se deslocam.

Nas seções transversais dos perfis, é possível verificar locais em que as componentes da corrente seguem em sentidos opostos, tais como no Perfil 2 (preamar) e nos Perfis 1, 2 e 3 (baixa-mar). Fica evidente, ainda, a variação da velocidade da corrente entre as camadas superficiais e de fundo, apresentando maiores componentes próximo à superfície.

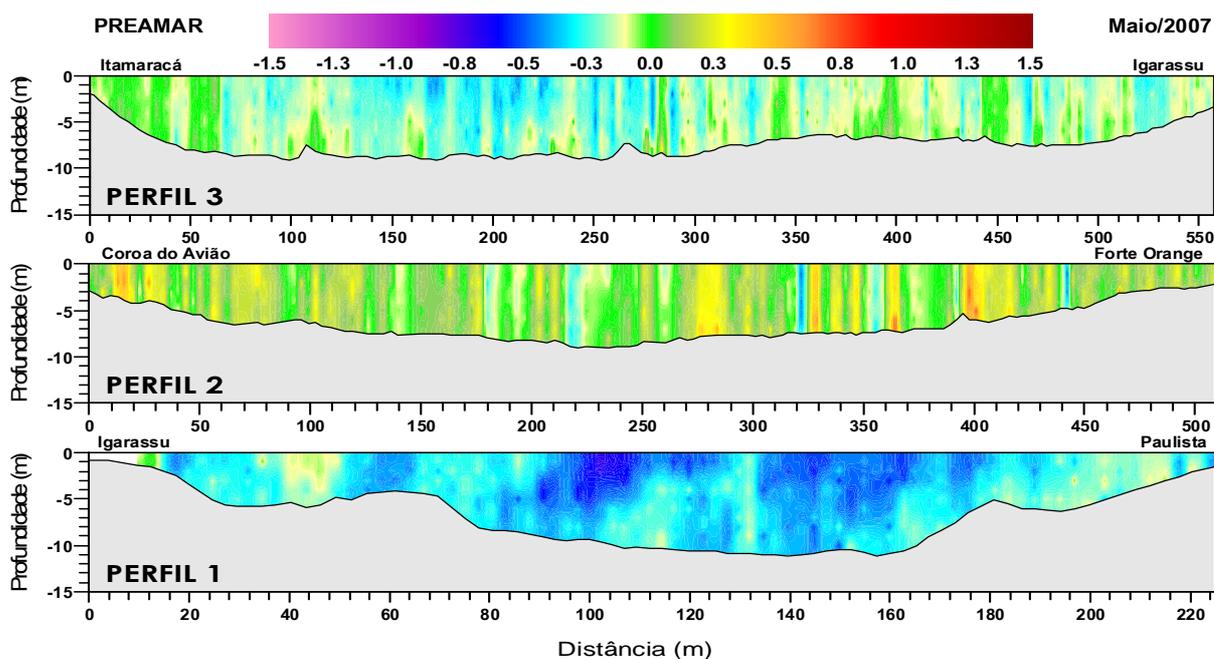


Figura 11 – Distribuição vertical das componentes N e L do vetor corrente, na preamar

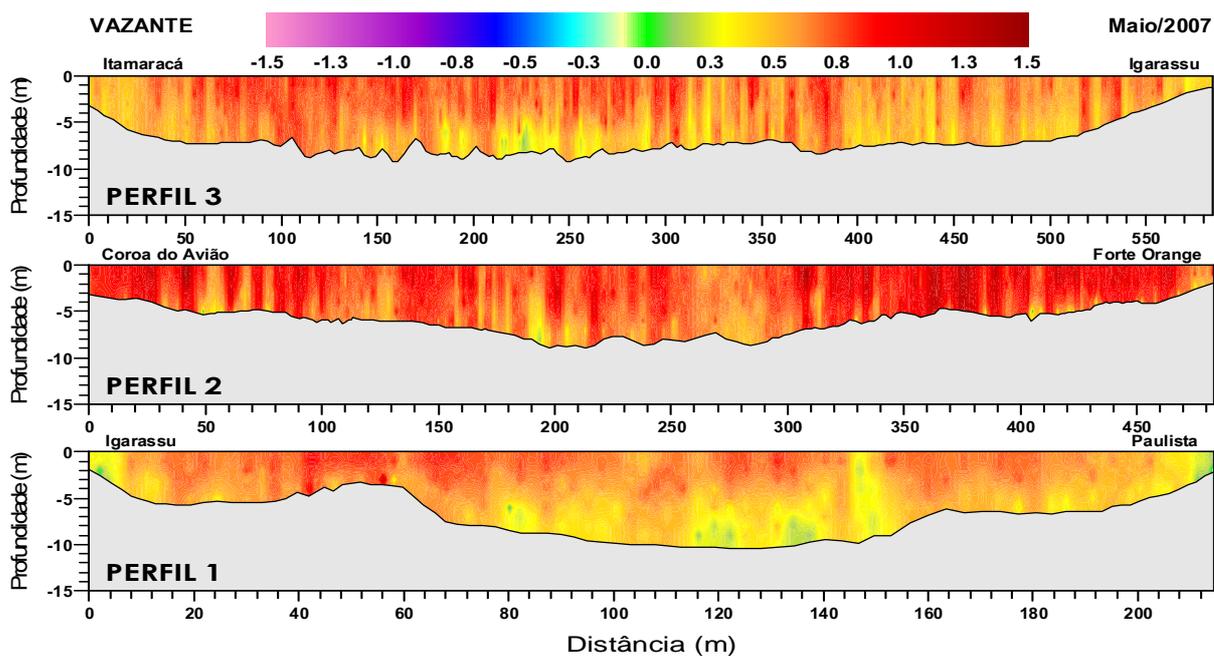


Figura 12 – Distribuição vertical das componentes N e L do vetor corrente, na vazante.

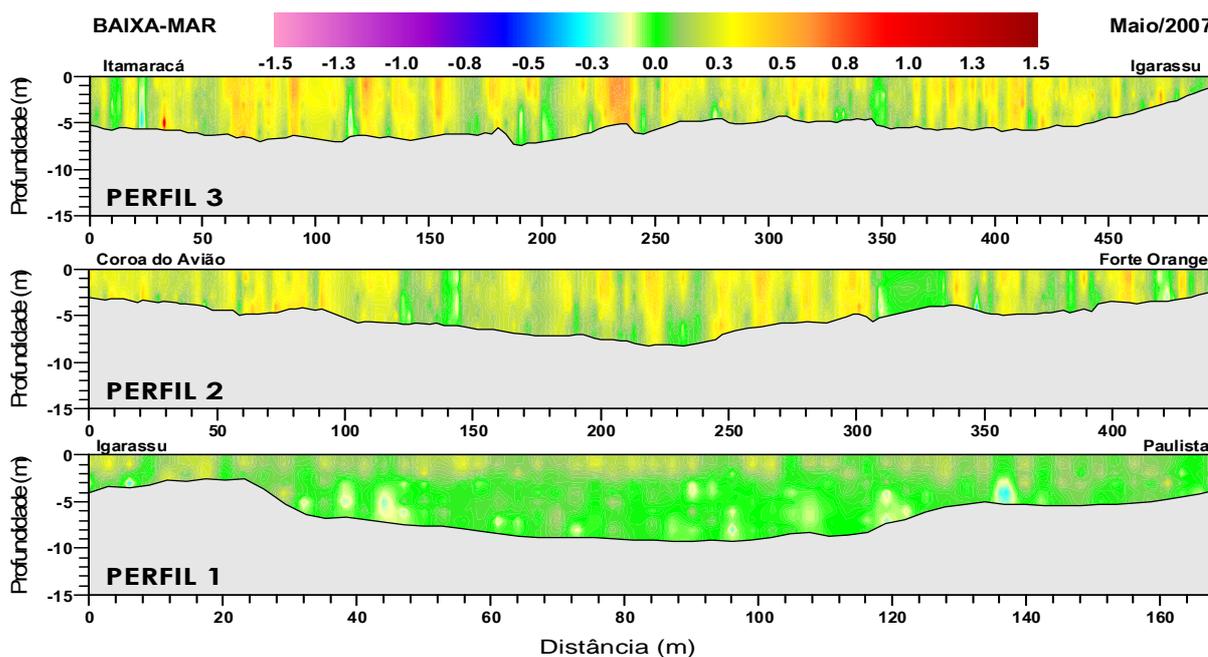


Figura 13 – Distribuição vertical das componentes N e L do vetor corrente, na baixa-mar.

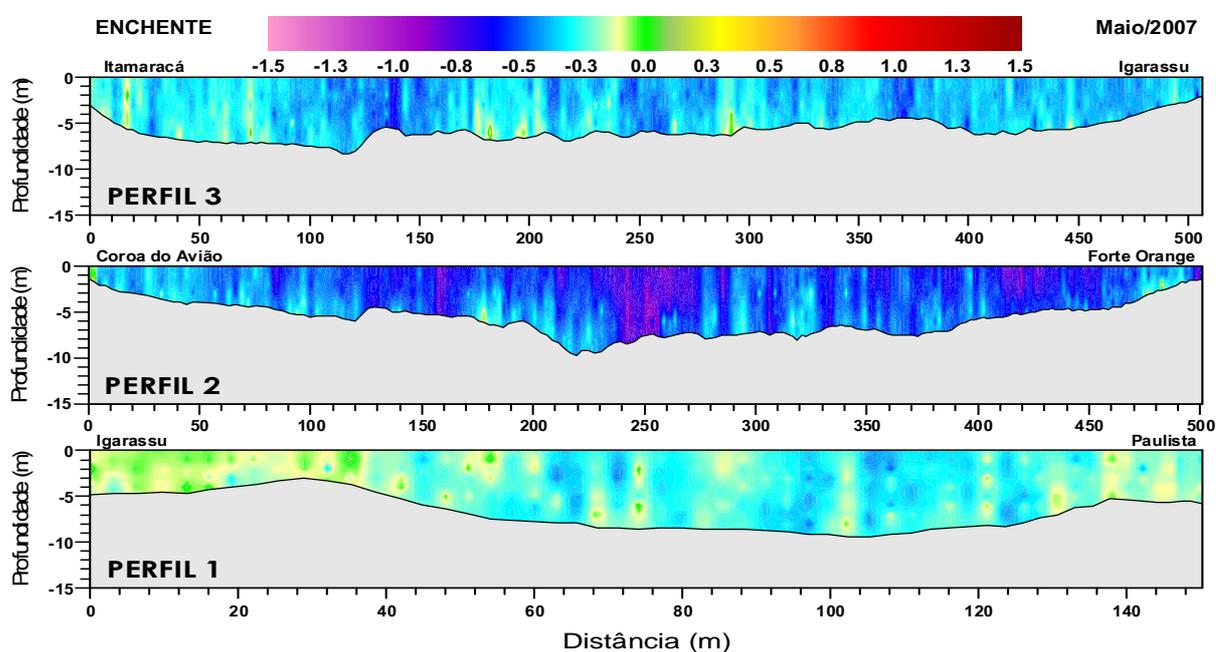


Figura. 14 – Distribuição vertical das componentes N e L do vetor corrente, na enchente.

CIRCULAÇÃO RESIDUAL NO BRAÇO SUL DO CSC E NO RIO TIMBÓ

A circulação residual refere-se à média no tempo do movimento da água no estuário (correntes de maré), ou seja, ela indica a direção e o sentido preferencial do fluxo neste sistema. Por isso, deve ser determinada com base em medições sistemáticas, durante vários ciclos de maré, e nunca, a partir de uma única medição instantânea.

Em geral, o padrão de circulação residual e a intensidade das correntes são conseqüências da intensidade das marés, descarga dos rios e geometria do canal. Com base nas medições executadas nos meses de janeiro, maio e julho de 2007 foram calculados o fluxo da circulação residual no braço sul do CSC e no rio Timbó, conforme ilustrado na Figura 15.

Os resultados indicaram que, no período seco (janeiro/2007), o fluxo da circulação residual seguiu no sentido a jusante, no braço sul do CSC. Todavia, no período chuvoso (maio e julho/2007), com o aumento da descarga de água doce e durante maré de sizígia, a circulação residual seguiu a montante.

O fluxo da circulação residual no rio Timbó seguiu a jusante (Norte), durante o período seco (janeiro/2007). Entretanto, verificou-se que no período chuvoso (maio/2007), o fluxo ocorreu em direção ao oceano aberto (Leste).

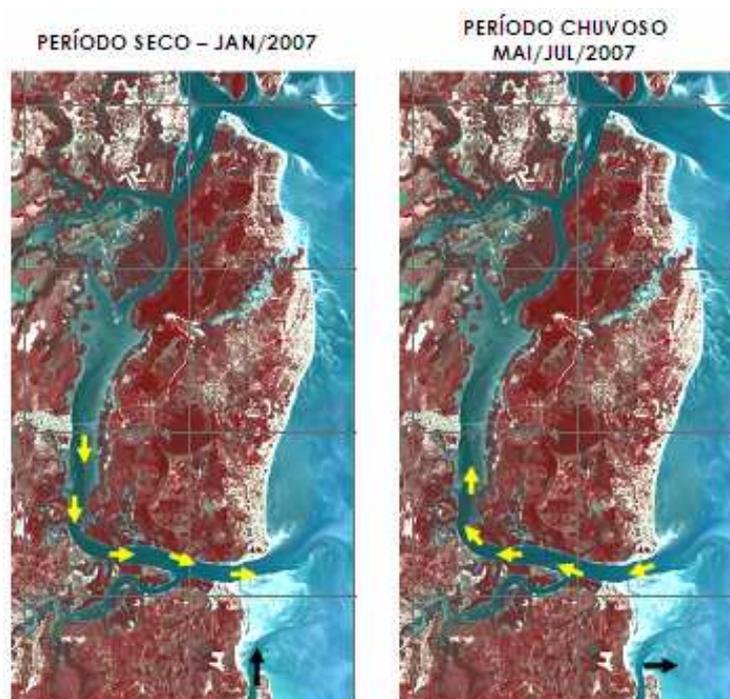


Figura 15 – Representação esquemática do fluxo da circulação residual no Canal de Santa Cruz e rio Timbó

CONDIÇÕES QUE FAVORECEM A FORMAÇÃO DE BANCOS DE AREIA E FEIÇÕES SEDIMENTARES

Entender a circulação é importante para avaliar, dentre outras, as tendências de sedimentação. Dessa forma, a representação esquemática de setas sobrepostas à fotografia aérea, ilustrada na Figura 16, indica o sentido do fluxo da circulação residual (Norte e Leste) no rio Timbó, relacionado a formações sedimentares.

Os vetores N (seta amarela) e E (seta verde) na Figura 16, indicam o sentido do fluxo da circulação residual, Norte e Leste, que favorece a formação de bancos de areia paralelos e transversais à costa, respectivamente.

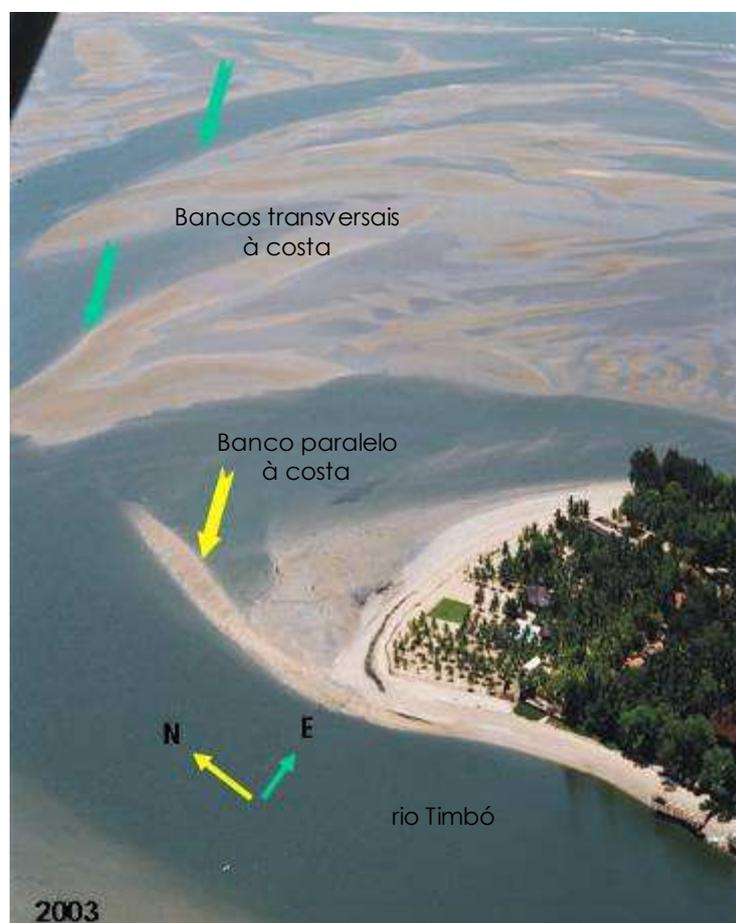


Figura 16 – Fotografia aérea da foz do rio Timbó (Fonte: Coutinho & Guerra, 2004), com indicação dos sentidos de fluxo associados à formação de bancos de areia paralelo e transversal à costa.

A intensidade das correntes próximas à base é importante para avaliar o transporte de sedimentos de fundo. Quando a intensidade dessas componentes supera as forças de gravidade e de atrito que atuam nas partículas de fundo, existe a possibilidade do transporte de partículas mais grossas. Portanto, a velocidade da corrente e o tamanho dos

grãos constituem parâmetros de controle fundamentais ao início do movimento e ao transporte relativo, condicionando os fenômenos de erosão e/ou deposição.

Ashley (1990) constatou, a partir de experimentos, uma condição que favorece a formação de diferentes tipos de feições deposicionais. No presente estudo, foi estabelecido que o transporte de sedimentos de fundo, existente em ambientes arenosos, ocorre onde as profundidades das águas são superiores a 1 m, sedimentos de tamanhos superiores a 0,15 mm e velocidades médias da corrente, maiores que $0,40 \text{ m s}^{-1}$.

Os sedimentos de fundo do CSC foram caracterizados e mapeados por Silva (2004; 2005; 2008). Esta autora obteve, para o braço sul do CSC, um padrão de deposição formado por areia fina (0,25 mm a 0,063 mm) a média (0,5 mm a 0,25 mm), com poucas ocorrências de cascalho ($> 2 \text{ mm}$). Em relação aos aspectos texturais, a mesma caracterizou fácies de areia como sendo, fundamentalmente, compostas por quartzos (componentes terrígenos) e, em menor proporção, por material biotrófico (influência marinha).

Considerando estas observações e as comparando com os valores obtidos, pode-se sugerir que a areia média depositada no braço sul do CSC está relacionada à hidrodinâmica de maior energia, que é corroborado pelos valores máximos de intensidade próximos ao fundo: $0,64 \text{ m s}^{-1}$ (Perfil 3) e $0,90 \text{ m s}^{-1}$ (Perfil 2), obtidos no estágio de vazante, obtidos no presente estudo.

Estudo sedimentológico desenvolvido por Coutinho & Guerra (2004) em amostras coletadas a jusante da embocadura do rio Timbó, apresentou composição constituída por areia média quartzosa (0,5 mm a 0,25 mm), com material biotrófico de textura mais grossa. Também foi identificada a presença de lama com areia muito fina no leito dos canais que se encontram na margem interna dos recifes submersos.

Baseado no estudo de Ashley (1990), foram relacionados: dados medidos *in situ* de intensidade e direção de corrente e batimetria; dados calculados de circulação residual; e dados da textura sedimentar apresentados por Silva (2004) e Coutinho e Guerra (2004), relativos aos Perfis 1, 2 e 3, apresentados nas Tabelas 1 a 3.

As Tabelas 1, 2 e 3 relacionam os dados de intensidade máxima da corrente próxima ao fundo ($v_{f_{\text{máx}}}$); intensidade média (V) e direção (θ) da corrente no final do ciclo da maré (circulação residual), referentes aos meses de janeiro, maio e julho de 2007; tamanho dos grãos do sedimento existente na área analisada; e profundidade no centro da seção transversal dos perfis.

Tabela 1 – Maio/2007. Intensidade máxima da corrente próxima ao fundo, circulação residual (intensidade e direção), tamanho dos grãos e profundidade no centro da seção transversal.

ADCP	MAIO DE 2007				
	$v_{f_{máx}}$ (m s ⁻¹)	V (m s ⁻¹)	θ (grau)	Tamanho dos grãos (mm)	Profundidade (m)
PERFIL 3	0,64 (VZ)	0,0667	269	0,063 – 0,25 a 0,25 - 0,5	7,0
PERFIL 2	0,90 (VZ)	0,0887	290	0,063 – 0,25 a 0,25 - 0,5	8,4
PERFIL 1	0,62 (VZ)	0,0574	94	0,25 - 0,5	10,0

Tabela 2 – Janeiro/2007. Intensidade máxima da corrente próxima ao fundo, circulação residual (intensidade e direção), tamanho dos grãos e profundidade no centro da seção transversal.

CORRENTÔMETRO	JANEIRO DE 2007				
	$v_{f_{máx}}$ (m s ⁻¹)	V (m s ⁻¹)	θ (grau)	Tamanho dos grãos (mm)	Profundidade (m)
PERFIL 3	0,34 (VZ)	0,0091	37	0,063 – 0,25 a 0,25 - 0,5	6,5
PERFIL 2	0,54 (VZ)	0,0467	95	0,063 – 0,25 a 0,25 - 0,5	8,4
PERFIL 1	0,53 (EN)	0,0116	0,4	0,25 - 0,5	8,8

Tabela 3 – Julho/2007. Intensidade máxima da corrente próxima ao fundo, circulação residual (intensidade e direção), tamanho dos grãos e profundidade no centro da seção transversal.

CORRENTÔMETRO	JULHO DE 2007				
	$v_{f_{máx}}$ (m s ⁻¹)	V (m s ⁻¹)	θ (grau)	Tamanho dos grãos (mm)	Profundidade (m)
PERFIL 3	0,40 (EN;VZ)	0,0167	286	0,063 – 0,25 a 0,25 - 0,5	6,5
PERFIL 2	0,63 (EN;VZ)	0,0263	356	0,063 – 0,25 a 0,25 - 0,5	8,4

O resultado da análise indica que há uma interação entre esses parâmetros na formação de feições sedimentares do segmento da zona costeira, que representa a área de estudo.

As intensidades máximas encontradas nas proximidades do fundo, nos meses de janeiro e julho (correntometria) e maio (ADCP), conforme Ashley (1990), são suficientes para provocar deslocamentos nos sedimentos de fundo encontrados no braço sul do CSC (areia fina a média) e rio Timbó (areia média com material biodetrítico de textura mais grossa).

A direção da circulação residual no CSC, apresentada nas Tabelas 1 a 3, indica que o transporte dos sedimentos de fundo ocorreu a montante dos Perfis 2 e 3 nos meses de maio e julho de 2007 e, seguiu a jusante, durante o mês de Janeiro de 2007.

EFEITO DE MOLHE HIDRÁULICO NA DESEMBOCADURA DO CSC

No segmento de costa ao sul da ilha de Itamaracá, a dinâmica é controlada pela interação entre o fluxo do CSC, descarga do rio Timbó, deriva litorânea e correntes de maré. Nesta região, a partir de observações *in situ*, corroboradas pela presença do banco da Coroa do Avião e deposição na foz do rio Timbó, foi identificado o processo de “efeito de molhe hidráulico”, formado pela elevada descarga no braço sul do CSC.

O efeito de molhe hidráulico no braço sul do CSC constitui uma barreira à deriva litorânea, fazendo com que haja o acúmulo de sedimentos a barlar da desembocadura do CSC e *déficit* de sedimentos, à sotamar da mesma (Figura 17).

Neste ponto, a deposição de sedimentos é intensa com, inclusive, efeito de progradação da linha de costa a barlar da desembocadura do CSC. Os depósitos sedimentares são observados *in situ*, claramente, no período de baixa-mar, sob forma de enorme banco arenoso.

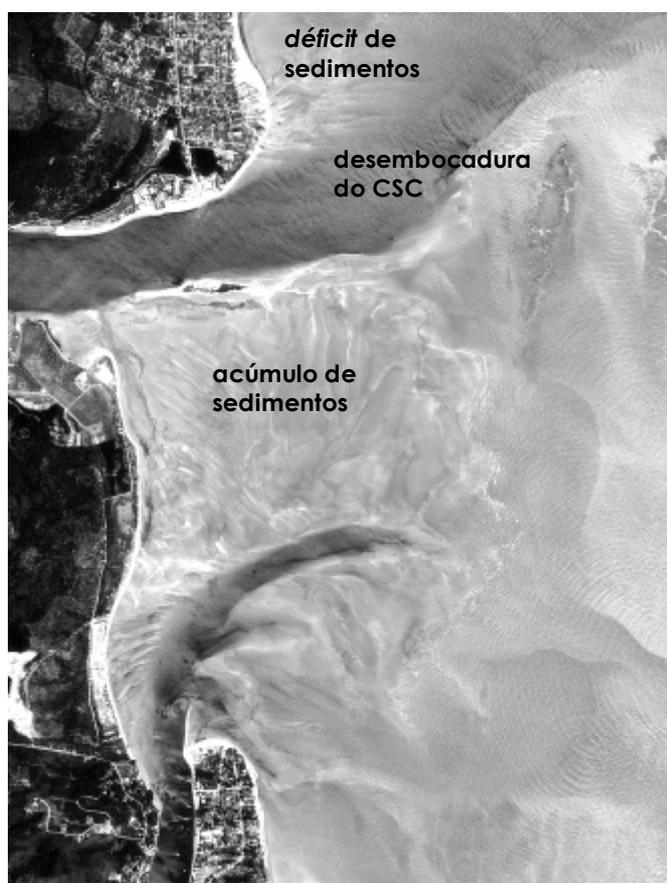


Figura 17 – “Efeito de molhe hidráulico no CSC”- banda 1 do satélite IKONOS, de 14/12/2005.

A descarga do CSC (Perfil 2), que atua como barreira à deriva litorânea, apresenta uma vazão 62% superior à do rio Timbó (Perfil 1), calculada no estágio de vazante a partir do levantamento por ADCP.

Como consequência do efeito de molhe hidráulico do CSC, o fluxo do rio Timbó, que anteriormente seguia no sentido N-NE, passou a migrar para Leste, formando um depósito sedimentar que se estende perpendicularmente à costa, em direção ao oceano aberto. Esse processo de deposição sedimentar é comprovado pela direção do módulo da resultante da corrente, no Perfil 1, que no período chuvoso (maio/2007), apontou para Leste.

A dinâmica e a diversidade de feições observadas em fotografias aéreas e imagens de satélite, ao longo dos anos, mostra a intensificação do molhe hidráulico no CSC. O crescimento do banco arenoso a barlar da desembocadura do CSC, observado nas imagens da Figura 18, indica que o efeito molhe, possivelmente, se tornou mais intenso.

Verifica-se, ainda, na série temporal de imagens, representada na Figura 18, toda a modificação do sistema deposicional entre o CSC e o rio Timbó. A tendência da progradação é clara, quando se observa o aumento de volume de sedimento ao longo do tempo.

De acordo com medidas de intensidade de correntes, cálculos de vazão e análise temporal em imagens, este estudo comprovou cientificamente que o “efeito molhe” da desembocadura sul do CSC existe e está atuante, proporcionando tanto o “crescimento” do banco de areia posicionado a barlar do CSC e, conseqüentemente, da Coroa do Avião, como o aumento no *déficit* de sedimentos ao longo da costa de Itamaracá.

Os resultados do presente estudo corroboram o estudo de Amaral *et al.* (1989) sobre a dinâmica sedimentar, ao identificarem que os sedimentos erodidos a oeste da desembocadura do rio Timbó eram depositados ao norte, porém sem ultrapassar o molhe hidráulico formado pelo CSC. Os resultados mais evidentes do referido estudo foram a formação da Coroa do Avião e o assoreamento da foz do rio Timbó.



Figura 18 - Intensificação do efeito de molhe hidráulico na desembocadura do braço sul do CSC.

CONCLUSÃO

O estudo da hidrodinâmica e dos parâmetros termohalinos, ao sul da ilha de Itamaracá, caracteriza-se de grande importância, pois vem suprir a ausência de dados dessa natureza em uma região em que a dinâmica é bastante complexa e as mudanças de suas características são intensas.

Os resultados da análise dos parâmetros termohalinos, na camada superficial do braço sul do CSC, indicaram uma variabilidade sazonal, com valores menores da temperatura e salinidade no período chuvoso. Não foi observada estratificação em relação à temperatura e à salinidade, ao longo da coluna d'água, indicando que a circulação no braço sul do CSC é, predominantemente, dominada pela forçante da maré.

No braço sul do CSC o fluxo da circulação residual seguiu em direção a jusante no período seco (janeiro/2007) e em direção a montante, no período chuvoso (maio e julho/2007), indicando as tendências de formação de feições sedimentares. Já no rio Timbó, a circulação residual seguiu em direção ao norte, no período seco, onde foi observada formação de banco paralelo à costa. Durante o período chuvoso, a resultante da circulação seguiu em direção a leste, indicando a tendência de formação de bancos transversais à costa.

As intensidades das correntes medidas e a vazão calculada nas seções transversais no CSC e no rio Timbó, comprovaram, cientificamente, a existência de um **molhe hidráulico** na desembocadura sul do CSC, que funciona como uma barreira à deriva litorânea. Este processo favorece a deposição de sedimentos a barlar da desembocadura do CSC, com tendência de progradação da linha de costa, e o *déficit* de sedimentos ao longo da costa de Itamaracá.

REFERÊNCIAS

- AMARAL, R. F.; LIMA, A. T.; ASSIS, H. M. B. DE & MANSO, V. A. V., 1989. Estudo do comportamento atual da linha de costa entre as desembocaduras do rio Timbó e do canal Santa Cruz. Boletim – Paulista-PE-II. In: Congresso Brasileiro de Geologia 36. Natal. V. (2), p. 676-689.
- ASHLEY, G. M., 1990. Classification of Large-Scale Subaqueous Bedforms: A New Look at an Old Problem, *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol 60, pp 363-396.
- CHAVES, N. S., 1996. Beachrocks do Litoral Pernambucano: Estudo Sedimentológico e Análise de Isótopos Estáveis. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 80 p.
- CHAVES, N.S., 2000. Mecanismo de cimentação em sedimentos marinhos recentes, exemplo beachrocks do litoral pernambucano. Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista-UNESP, Campus Júlio de Mesquita, Rio Claro, 216p.
- COUTINHO, P. N. & GUERRA, N. C., 2004. Relatório final de monitoramento ambiental: dragagem no Pontal de Maria Farinha, Recife. Relatório Técnico (acesso restrito), 35 p.
- DOMINGUEZ, J. M. L.; BITTENCOURT, A. C. S. P; MARTIN L., 1983. O Papel da Deriva Litorânea de Sedimentos Arenosos na Construção das Planícies Costeiras Associadas às Desembocaduras dos Rios São Francisco (SE-AL), Jequitinhonha (BA), Doce (ES) e Paraíba do Sul (RJ). *Revista Brasileira de Geociências*, 13(2): p. 98-105.
- GALDINO, T.S., 2004. Zooplâncton Estuarino nas desembocaduras Norte e Sul do Canal de Santa Cruz, Itamaracá, PE. [Monografia de Bacharelado]. Recife (PE): Universidade Federal de Pernambuco.
- HANSEN, D. V. & RATTRAY Jr., M., 1966. New dimensions in estuary classification. *Limnol. Oceanogr.*, 11(3):319-325.
- HAYES, M. O., 1979. Barrier island morphology as a function of tidal and wave regime. Leatheman, S.P. (Ed.), *Barrier Island from the Gulf of Mexico*. Academia Press, New York.
- LAMEPE. 2009. Laboratório de Meteorologia de Pernambuco.
- LEITE, F.S.; ARAÚJO, M.; MEDEIROS, C., & ENDRES, J. P., 2008. Energy balance and mixing timescales in a stirring tropical estuary, Itamaracá, Brazil. *Journal of Coastal Research*, 24(1A), 151–160. West Palm Beach (Florida), ISSN 0749-0208.
- LEITE, F.S., 2004. Thermohaline Structure and Horizontal Spreading of the Santa Cruz Channel Plumes, Itamaracá Estuary, Brazil. Monografia. (XVI Curso de Especialização em Oceanografia) - Universidade Federal de Pernambuco. 42p
- MARTINS, M. H. A., 1997. Caracterização morfológica e vulnerabilidade do litoral da Ilha de Itamaracá – PE. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. 104 p.
- MEDEIROS, C., 1991. Circulation and Mixing Processes in the Itamaracá Estuarine System, Brazil. Tese de Doutorado. University of South Carolina. 131p.
- MEDEIROS, C. & KJERFVE, B., 1993. Hydrology of a tropical estuarine system: Itamaracá, Brazil. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 36, 495-515.
- MEDEIROS, C, KJERFVE, B., ARAÚJO, M. & NEUMANN-LEITÃO, S., 2001. The Itamaracá Estuarine Ecosystem. Brazil In: *Coastal Marine Ecosystems of Latin America*. 1 ed. Berlin: Springer Verlag, v.1, pp. 71-81.

- MELO, P. A. M. de C., NEUMANN-LEITÃO, S., GUSMÃO, L. M. de O. & PORTO NETO, F. F., 2008. Variação nictemeral do macrozooplâncton na Barra Orange – Canal de Santa Cruz, Estado de Pernambuco (Brasil).
- MENDONÇA, F. J. B. 2005. Posicionamento de alta resolução: adequação e aplicação à morfologia costeira. Tese doutorado. Universidade Federal de Pernambuco. 94 f.
- MESQUITA, E. J. P., 2003. Variação nictemeral do fluxo advectivo entre o Canal de Santa Cruz-PE e as águas costeiras adjacentes. Monografia. (XVI Curso de Especialização em Oceanografia) - Universidade Federal de Pernambuco. 42p.
- MIRANDA, L. B. de, CASTRO, B. M. de, KJERFVE, B., 2002. Princípios de oceanografia física de estuários. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo.
- OILIVEIRA, M. Q. C. de., 1999. Impacto decorrente das modificações no uso do solo nas características hidrossedimentológicas da bacia hidrográfica do rio Joanes e sua repercussão na Zona Costeira. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Bahia.
- PASSAVANTE, J. Z. O., 1981. Estudos ecológicos da região de Itamaracá, Pernambuco – Brasil. XIX Biomassa do nano e microfitoplâncton do Canal de Santa Cruz. Trab Oceanogr. Universidade Federal de Pernambuco 16:105-156.
- PITOMBEIRAS, E. S., 1996. Erosão Costeira Provocada por Migração de Embocadura na Praia do Pecém Ceará. *A Água em Revista*, 4(7):p.28-35.
- PRANDLE, D., 1985. On salinity regimes and the vertical structure of residual flows in narrow tidal estuaries. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 20:615-635.
- RATSBONA, L. R., 1976. The climate of Brazil. Vol 12. In: Schwerdtfeger W (ed) World survey of climatology – climates of Central and South America. American Elsevier, New York, pp 219-293.
- SILVA, L. A., 2004. Sedimentologia do Canal de Santa Cruz – ilha de Itamaracá-PE. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 97 p.
- TESSLER, M. G. & MAHIQUES, M. M. de., 2000. Processos oceânicos e a fisiografia dos fundos marinhos. In: Teixeira, W.; Toledo, M. C.; Rich, T. e Taioli F.(Org.) Decifrando a Terra. Editora: Oficina de Textos. 568 p.

CAPÍTULO 6

MAPEAMENTO DE FEIÇÕES DE BASE EM ÁGUAS COSTEIRAS RASAS BASEADO EM OPERADORES DIRECIONAIS

RESUMO

A identificação e o mapeamento das diferentes feições costeiras podem contribuir para entendimento dos processos de transporte e deposição de sedimentos associados à hidrodinâmica local. Este estudo apresenta uma metodologia que utiliza operadores para detecção de bordas, na banda1 das imagens SPOT5/HRG (2003) e IKONOS (2005), para identificar feições de base em águas costeiras rasas. Os resultados obtidos a partir do operador *Compass-gradient* de Prewitt forneceu imagens com feições sedimentares do tipo *sand waves*, *swash-bar* e formações, tais como, dique marginal, bancos transversais e canais de fluxo, resultantes da hidrodinâmica, além de recifes algálicos. Essas informações são subsídios importantes para a navegação, planejamento de obras de defesa de costa e modelagem da hidrodinâmica costeira.

Palavras-chave: Detecção de bordas. Extração de feições. Mapeamento de águas rasas. Operador direcional Prewitt. Processamento de imagem. Itamaracá.

INTRODUÇÃO

Imagem de satélite de águas costeiras rasas pode fornecer informações qualitativas e quantitativas sobre as feições de base submersa, que são importantes para o acompanhamento e entendimento dos processos de transporte e deposição de sedimentos. Ademais, estudos batimétricos são essenciais para navegação, planejamento de obras costeiras e modelagens hidrodinâmicas dessas regiões. Contudo, sua estimativa por sistemas ópticos passivos está relacionada à qualidade do sinal que o sensor recebe das regiões submersas e, que varia em função do comprimento de onda, da profundidade, claridade da água e reflectância da base. Os sistemas ativos, que operam na faixa de microondas, também podem obter importantes informações sobre a configuração do assoalho do oceano, em águas rasas, a partir da interpretação e análise do padrão de textura da superfície da água, tal como fornecido pelo sensor VIRR (radar imageador) do satélite SEASAT (*The Open University, Milton Keynes, UK*).

As técnicas de detecção de bordas, que atuam no domínio da frequência espacial, mostram-se sensíveis à variação abrupta do gradiente da imagem, além de operarem diretamente sobre os *pixels* da imagem original, considerando uma vizinhança local. Mudanças de funções contínuas são normalmente descritas usando derivadas. Assim, como uma imagem de satélite é uma função bidimensional, os operadores que descrevem bordas são expressos usando derivadas parciais. A hipótese de aplicar operadores derivativos em dados monocromáticos do espectro visível, que abrange as faixas do azul (450 – 520 nm) e do verde (520-600 nm), pode gerar informações das características das feições submarinas, distintas daquelas coletadas pelos sistemas ativos e pela análise de dados multiespectrais por sensores passivos.

Esse estudo testa e avalia o uso de operadores direcionais para determinar as feições de base em águas rasas, a partir de imagens de satélite. Existe uma variedade de algoritmos para detecção de bordas, porém, ao longo do desenvolvimento do presente estudo foram utilizados os operadores derivativos de gradiente Prewitt, Laplaciano e os direcionais Prewitt (*Compass-gradient*).

DETECÇÃO DE BORDAS POR DERIVADAS

Identificar e classificar os objetos é uma importante etapa na análise de imagens digitais. As bordas e os contornos definem os limites desses objetos e a separação de regiões não similares, em função da intensidade dos *pixels*, apresentando informação do

objeto de interesse. Dessa forma, os métodos de identificação de discontinuidades da intensidade, que marcam as bordas de objetos ou de feições em uma imagem, consistem em um processo essencial para essa análise e são normalmente baseados no cálculo do gradiente de intensidade da imagem.

Um gradiente de alta intensidade indica uma transição brusca da intensidade e constitui uma evidência para a existência de uma borda (Awcock & Thomas, 1996). Basicamente, o cálculo do gradiente pode utilizar operadores de detecção de bordas, baseados em derivadas parciais de primeira ordem (função gradiente) e segunda ordem (função laplaciano), aproximadas por diferenças-finitas.

A Figura 1 mostra que a primeira derivada (gradiente) da distribuição dos níveis de cinza dos *pixels* é positiva, na transição do *pixel* escuro para o claro e negativo, na transição do claro para o escuro.

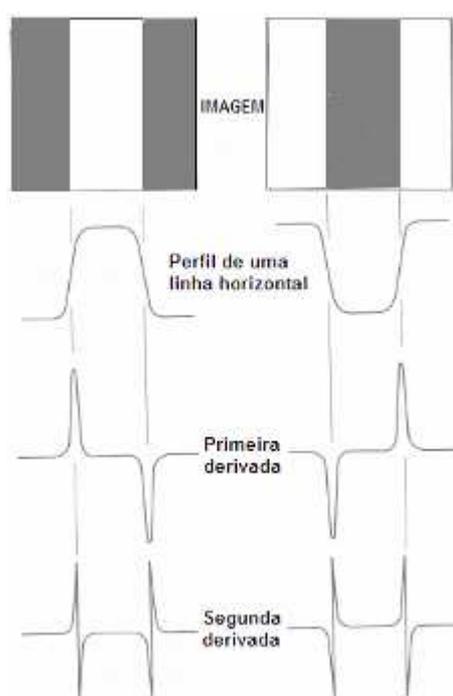


Figura 1 – Detecção de bordas por operadores de derivação (Gonzalez & Woods, 2002).

A sua magnitude indica a presença de uma borda. Para níveis de cinza constantes a derivada é nula. A segunda derivada (laplaciano) produz um cruzamento por zero, no meio de um duplo pico bidirecional da transição, sendo positivo na transição associada ao lado escuro da borda e negativo associado ao lado claro da borda. O sinal da segunda derivada indica o lado da borda, a qual um *pixel* pertence (Gonzalez & Woods, 2002; Awcock & Thomas, 1996).

OPERADORES DE GRADIENTE

Os operadores derivativos baseados na função gradiente aproxima as derivadas de primeira ordem nas direções dos eixos x e y da imagem e apresentam a vantagem de realçar as bordas nessas direções. Em detecção de bordas, a magnitude do vetor gradiente ∇f , aponta na direção de mudança mais rápida de f na posição (x, y) (Gonzalez & Woods, 2002), denotada por:

$$\nabla f = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2} \quad (1)$$

onde $\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)$ é a derivada parcial na direção x e $\left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)$ é a derivada parcial na direção y .

As derivadas da função digital f são definidas por diferenças-finitas e a Equação (1) é a base para várias abordagens. Visto que, essa expressão pode ser computacionalmente dispendiosa, normalmente, aproxima-se o gradiente pela soma dos valores absolutos, sendo expressa por:

$$\nabla f \approx |G_x| + |G_y| \quad (2)$$

Onde: G_x e G_y são as aproximações das primeiras derivadas das componentes x e y , respectivamente.

$$G_x = \nabla_x f(x, y) \approx f(x, y) - f(x-1, y) \quad (3)$$

$$G_y = \nabla_y f(x, y) \approx f(x, y) - f(x, y-1) \quad (4)$$

Essa aproximação preserva as mudanças relativas de intensidade, mas não tem isotropia, ou seja, certas orientações de borda são mais favorecidas que outras. A componente de orientação do vetor gradiente atua perpendicular à direção da borda a ser realçada na imagem. O ângulo $\alpha(x, y)$, medido em relação ao eixo x , define a direção desse vetor e é dado por:

$$\alpha(x, y) = \tan^{-1}\left(\frac{G_y}{G_x}\right) \quad (5)$$

O operador gradiente utiliza duas máscaras sensíveis às bordas, na direção vertical e na horizontal e geram imagens estimando a magnitude do gradiente de borda e a orientação da borda da imagem original.

OPERADOR LAPLACIANO

Os operadores derivativos, baseados na função *laplaciano*, aproximam as derivadas de segunda ordem nas direções dos eixos x e y da imagem. O laplaciano de uma função bidimensional $f(x, y)$ é isotrópico e denotado por:

$$\nabla^2 f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \quad (6)$$

Assim como a função gradiente, a Equação (4) pode ser aproximada na forma digital por diferentes maneiras. A exigência para a definição do laplaciano é que o coeficiente associado ao *pixel* central da máscara, seja positivo e que os *pixels* externos, sejam negativos.

OPERADORES DIRECIONAIS OU COMPASS-GRADIENT

Existem outros operadores que consistem em conjuntos de máscaras que representam aproximações discretas, em direções pré-determinadas. Estes operadores incluem as máscaras direcionais, tais quais as introduzidas por Prewitt (1970) e que foram utilizadas nesse trabalho.

MÉTODOS

ÁREA DE TESTE

O Método de detecção de bordas para determinar as feições de base a partir de imagem de satélite, foi aplicado à área que compreende o segmento da zona costeira, ao sul da ilha de Itamaracá, Estado de Pernambuco, Nordeste do Brasil. A região se apresenta destacada no canto inferior direito da Figura 2 e, situa-se entre 7° 47' 50'' e 7° 51' 12'' de latitude sul e 34° 51' 14'' e 34° 48' 30'' de longitude oeste.

A escolha da área foi motivada pelas transformações, a qual se encontra submetida nas escalas de tempo e espaço, em virtude da mistura de águas continental e

oceânica. Abrange as desembocaduras do braço sul do Canal de Santa Cruz (CSC) e do rio Timbó, cuja vazão intensifica a hidrodinâmica local e dificultam a caracterização do padrão de circulação costeira. Seguindo a classificação de Hayes (1979), as marés que atuam na costa de Itamaracá são do tipo mesomaré (1 - 2 m).

Os sedimentos atuais de praia na ilha de Itamaracá se caracterizam pelos depósitos quaternários costeiros, constituídos por areia fina a grossa, cascalhos, conchas de moluscos, ocorrendo ao longo da linha de costa (Martins, 1997).

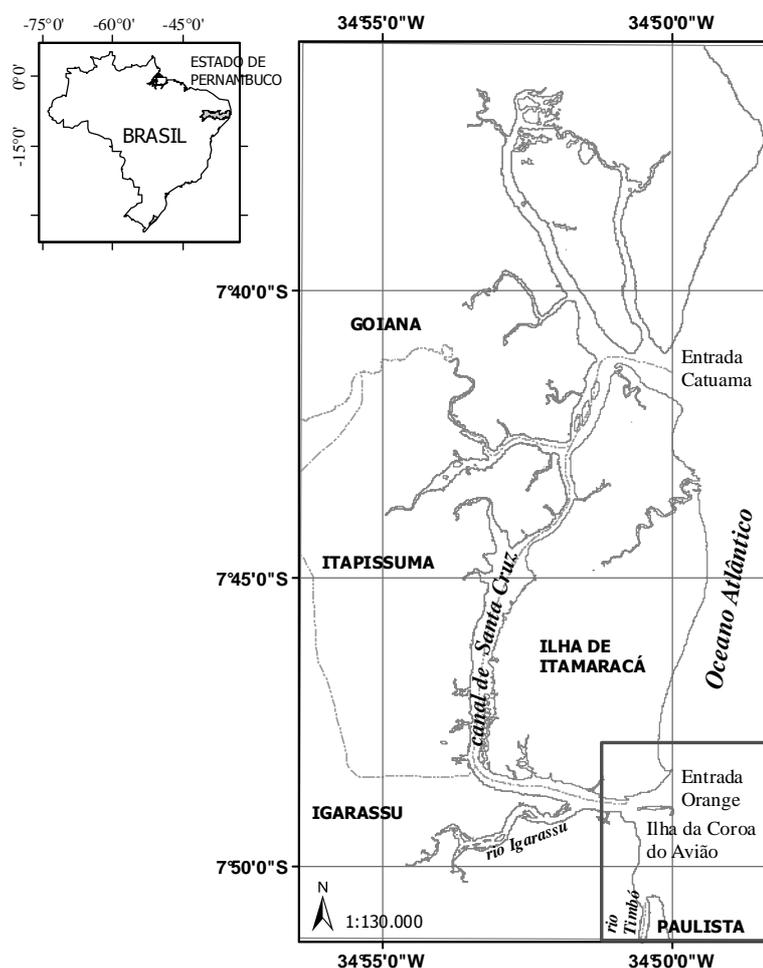


Figura 2 – Localização da área de teste, costa sul de Itamaracá, Nordeste do Brasil.

Ecossistema como manguezal coexiste com áreas urbanas, pesca artesanal, intenso tráfego de embarcações motorizadas em função de atividades de lazer e turismo. A profundidade mínima na preamar, abaixo de 2 m (observada durante o levantamento batimétrico) e, a rapidez com que ocorrem as mudanças das feições

submersas nessa região, dificulta a navegação próxima à costa e o planejamento de obras costeiras.

DETECÇÃO DE BORDAS UTILIZANDO OPERADORES DE GRADIENTE E LAPLACIANO

Considerando uma região 3×3 da imagem original (Figura 3a), onde as coordenadas (x, y) definem o *pixel* central, a Equação (1) foi aproximada por diferenças-finitas por:

$$\nabla f(x, y) \approx \left[(f(x+1, y-1) + f(x+1, y) + f(x+1, y+1)) - (f(x-1, y-1) + f(x-1, y) + f(x-1, y+1)) \right] + \left[(f(x-1, y-1) + f(x, y+1) + f(x+1, y+1)) - (f(x-1, y-1) + f(x, y-1) + f(x+1, y-1)) \right] \quad (7)$$

A diferença entre a terceira e a primeira linha da região 3×3 aproxima a derivada de primeira ordem na direção x , e a diferença entre a terceira e a primeira coluna aproxima a derivada na direção y (Gonzalez & Woods, 2002). Os modelos das máscaras obtidas pela aproximação da diferenciação são mostrados na Figuras 3(b) e (c).

A aproximação da Equação (6) usada para o operador laplaciano bidimensional, considerando a posição *pixel* (x, y) no centro da imagem (Figura 3a), levando ao modelo na Figura 3(d), é dada por:

$$\nabla^2 f(x, y) \approx 4f(x, y) - f(x-1, y) - f(x, y-1) - f(x, y+1) - f(x+1, y) \quad (8)$$

$f(x-1, y-1)$	$f(x-1, y)$	$f(x-1, y+1)$
$f(x, y-1)$	$f(x, y)$	$f(x, y+1)$
$f(x+1, y-1)$	$f(x+1, y)$	$f(x+1, y+1)$

(a)

-1	-1	-1
0	0	0
1	1	1

(b)

-1	0	1
-1	0	1
-1	0	1

(c)

0	-1	0
-1	4	-1
0	-1	-0

(d)

Figura 3 – (a) Uma região 3×3 da imagem original; (b) modelo do operador de gradiente Prewitt, direção x (c) modelo do operador de gradiente Prewitt, direção y ; (d) modelo do operador laplaciano.

OPERADOR DIRECIONAL PREWITT

O uso de operadores direcionais (Compass-gradient operator) constitui uma abordagem alternativa para a detecção de borda de gradiente diferencial. Existe uma variedade de operadores direcionais, entretanto, o critério para o uso do detector de borda Prewitt, em sensoriamento remoto, é baseado no fato de que a imagem de satélite, por si mesma, pode indicar uma acentuada transição de intensidade, em várias direções.

Essa técnica consiste na convolução da imagem original por um conjunto total de oito máscaras, que representam bordas ideais, em orientação específica. Para cada *pixel*, a magnitude do gradiente de borda local (Maini & Sohal, 2006) é estimada com a resposta máxima de todos os oito filtros nessa mesma posição, denotada pela expressão:

$$|G| = \max(|G_i| : i = 1 \cdot a \cdot n) \quad (10)$$

Onde: G_i é a resposta do filtro i na posição particular e n é o número da máscara de convolução. Assim, orientação da borda local é estimada a partir da direção da máscara que cede a resposta máxima.

O operador de Prewitt possui o conjunto total de 8 máscaras, as quais são produzidas tomando um dos filtros e rotacionando seus coeficientes. Cada máscara resultante é sensível a uma orientação de borda que varia entre 0° a 315° , em intervalos de 45° (Maini & Sohal, 2006).

Entretanto, neste estudo, a convolução direcional da banda1 do satélite SPOT5 foi realizada utilizando as 8 máscaras do operador Prewitt, separadamente. Foi considerada uma vizinhança 3×3 , destacando as bordas ideais nas orientações discretas de 0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° e 315° (Figura 4).

O processamento fornece uma resposta máxima a partir da máscara, cuja orientação se dá na direção perpendicular à mudança de intensidade detectada na imagem. Observa-se que a soma dos coeficientes das 8 máscaras de Prewitt é zero, indicando uma resposta nula em regiões uniformes.

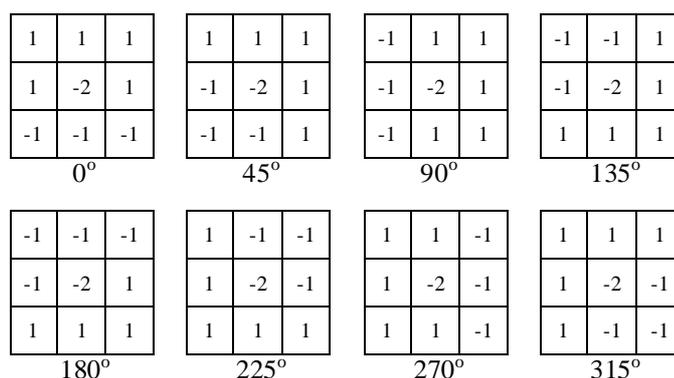


Figura 4 – Máscaras de detecção de bordas direcionais (Compass-gradient) Prewitt

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O estudo de operadores direcionais para mapear as feições de base, em águas costeiras rasas, depende de certos atributos específicos que são respaldados por métodos de diferenciação e convolução das imagens. Tais métodos utilizam, essencialmente, derivadas parciais, cujos princípios analisados deram suporte para as interpretações das feições sedimentares obtidas.

A aplicação das máscaras de gradiente (Figuras 3b e 3c) apresentou efeitos realçando feições que aparecem como mudanças mais abruptas da intensidade na imagem e eliminam características que mudam lentamente. Como são máscaras não-isotrópicas, certas orientações de bordas são favorecidas sobre outras, o que resultou no surgimento de bordas (desconhecidas) perpendiculares, apenas a essas direções. Entretanto, o operador de gradiente Prewitt apresenta como desvantagem a susceptibilidade ao ruído, haja vista que é computada a diferença-finita entre cada *pixel* de suas vizinhanças imediatas apenas nas direções horizontal e vertical, o que pode levar a resposta falsa.

O resultado da máscara laplaciano (Figura 3d) mostra como as informações, enfatizadas por filtro isotrópicos, podem destacar características de alta frequência da imagem. Por ser uma derivada de segunda ordem (*zero crossing*), o laplaciano é sensível a ruídos, de maneira inaceitável, por produzir bordas duplas, sendo incapaz de detectar a direção da borda (Gonzalez & Woods, 2002).

Os resultados dos operadores de gradiente Prewitt na direção x (eixo vertical); gradiente Prewitt na direção y (eixo horizontal) e laplaciano, aplicados na banda 1 da imagem do satélite SPOT5/HRG, de 27/07/2003, são ilustradas na Figura 5.

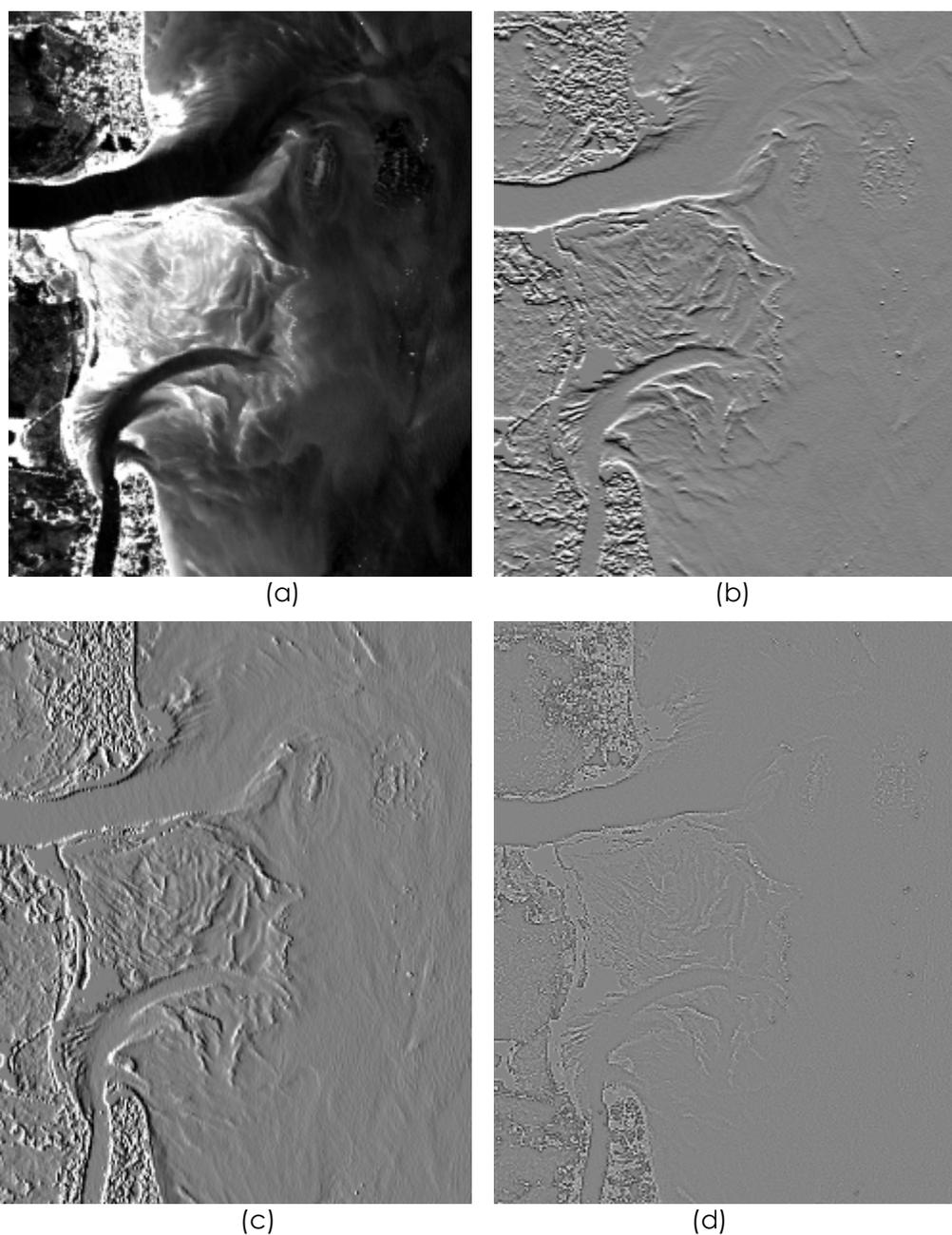


Figura 5 – (a) Imagem original do satélite SPOT5/HRG, banda 1, de 27/07/2003. Resultados da aplicação das máscaras: (b) gradiente Prewitt na direção x (c) gradiente Prewitt na direção y ; (d) laplaciano.

As abordagens mostradas na Figura 4, que representam um conjunto de máscaras direcionais Prewitt, realçam bordas posicionadas em oito orientações distintas. Entre os operadores supracitados, o direcional (*Compass-gradient*) foi considerado como o adequado para a obtenção da feição de base em águas rasas, pela possibilidade de associar as feições às forçantes que a geram no assoalho oceânico. Os testes foram realizados com a banda1, que atua na faixa do espectro de 500-590 nm, do satélite SPOT5/HRG, de 27/06/2003 e a banda1 (450-520 nm) do satélite IKONOS, datada de 14/12/2005. Os tratamentos utilizados têm seus resultados apresentados e discutidos ilustrados pelas Figuras 6 e 7.

A imagem original da Figura 6 (a) foi “convoluída” para cada máscara, de vizinhança 3x3, que representa uma direção específica. As Figuras 6 (b) a (i) mostram as magnitudes do gradiente direcional a partir da aplicação das máscaras (Figura 4), cujas bordas detectadas representam as feições de base perpendiculares à direção da máscara.

As imagens da Figura 6 forneceram feições de base entrecortada por dois canais bem definidos (Figura 6f), representados na área de teste pelo CSC, ao norte e pelo rio Timbó, ao sul. A presença acentuada do dique marginal (Figura 6b), na margem esquerda do rio Timbó, responde a direção do operador em questão (0° em relação ao eixo x , que se encontra ao longo da vertical).

O processo de migração de embocadura fluvial é decorrente da presença de um trânsito litorâneo preferencial de sedimentos, associado à alteração das descargas fluviais (Oliveira, 2004). Os canais de fluxo do rio Timbó, resultante dessa migração, são identificados nas imagens filtradas ilustrada Figura 6 (b-i). O operador irá definir melhor os canais que se encontram perpendicular a sua direção.

Estudos desenvolvidos por Amaral *et al.* (1990), sobre o padrão geomorfológico da área analisada, indicam que os sedimentos erodidos, a oeste da desembocadura do rio Timbó, foram depositados ao norte, porém sem ultrapassar o molhe hidráulico formado pela desembocadura do CSC. Como resultado gerou o acúmulo de sedimentos (Figura 6i) a barlar da embocadura do CSC, onde provavelmente essa área se encontra submetida às condições hidrodinâmicas que possibilitem a deposição.

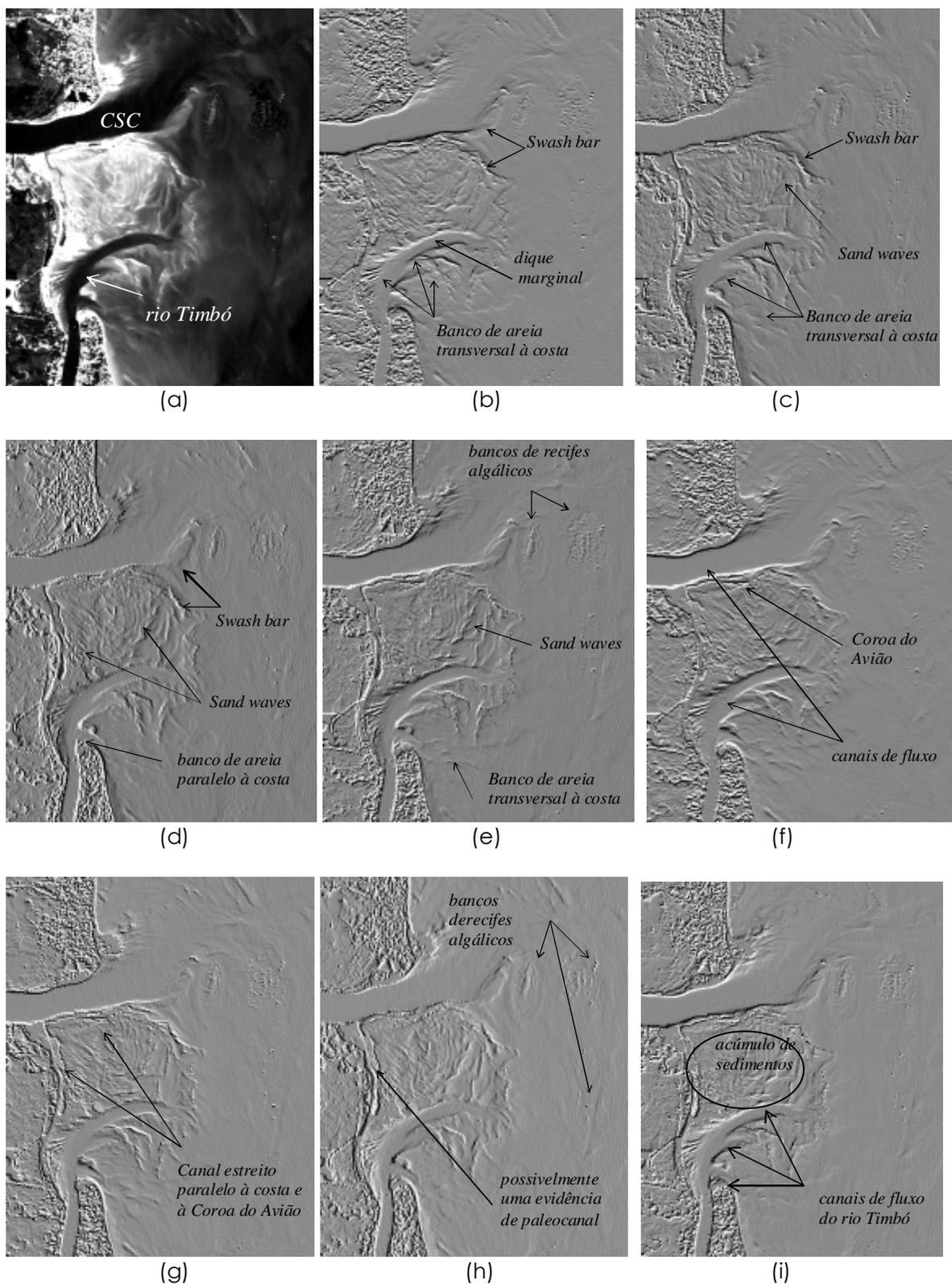


Figura 6 – (a) Imagem original do satélite SPOT5/HRG, banda1, de 27/06/2003. Resultados da aplicação das máscaras direcionais Prewitt: (b) 0° (c) 45°; (d) 90°, (e) 135°; (f) 180°; (g) 225°; (h) 270°, (i) 315°.

Nas imagens filtradas é possível visualizar o estreito canal de fluxo, onde numa análise preliminar, possivelmente, pode ser interpretado como paleocanal do curso do rio Timbó (Figura 6g,h). Destaca-se o canal paralelo à costa, no sentido norte, que possivelmente representa o curso mais antigo do rio Timbó. Devido a deposição sedimentar intensa nesta área, o referido canal é o único meio para a passagem de pequenas embarcações na baixa-mar, que segue paralelo à costa, em direção ao norte e desvia em 90° para leste, margeando a Coroa do Avião (Figura 6g).

Além disso, é identificada nas imagens filtradas, a grande variação de migração da foz do rio Timbó após o surgimento do efeito molhe do CSC. Na data de tomada da imagem SPOT5, a configuração do canal do rio Timbó se apresenta cerca de 90° para leste a partir de sua embocadura. Além da formação do dique marginal, nota-se a presença bem definida de bancos transversais à costa (Figura 6b) em ambas as margens do referido rio, indicando o direcionamento de crescimento do canal de fluxo, no sentido leste.

Entretanto, sabe-se que as feições, as quais não são perpendiculares a uma direção pré-estabelecida para a máscara, não se mostram bem definidas, podendo gerar imagens com ausência de relevos significativos relacionados à dinâmica de determinado fluxo hidráulico. Isso representaria um grave equívoco. Assim, é preciso realizar testes exaustivos para que fique evidenciada a morfologia da zona costeira estudada, sem dúvidas e interpretações dúbias.

Ao se alterar a direção do operador para 45° e 90° (Figuras 6c,d), a configuração do dique marginal do rio Timbó fica menos definida, mas as feições sedimentares tornaram-se mais evidentes. Foi possível observar os depósitos *sand waves* situados a barlamar da Coroa do Avião, que ocorrem como corpos sedimentares lineares; paralelos e inclinados em relação à costa. Essas ondulações são produzidas como resultado da interação de correntes e ondas sobre a superfície sedimentar e sua forma e tamanho são variáveis (Reineck & Singh, 1980), como podem ser observadas nas figuras citadas.

Nas imagens filtradas destacam-se claramente as cristas arenosas (ondulações ou *sand waves*) que se posicionam, em geral, paralelas umas as outras, reflexo do processo que rege a sua formação em águas marinhas rasas (Reineck & Singh, 1980). A Figura 6(c) apresenta descontinuidades nas cristas das *sand waves*, o que pode sugerir em migração do canal fluvial, causando o rompimento desses segmentos lineares, possivelmente associado aos regimes de maior intensidade da descarga fluvial.

Outra feição bem delimitada nesta máscara encontra-se na região posicionada mais a leste, na plataforma continental rasa. Trata-se da presença de bancos

de recifes algálicos (Figura 6e,h), que foram identificados por Chaves (1996; 2000) ao mapear as estruturas recifais, ao longo do litoral pernambucano.

Nas imagens da Figura 6(b,c,d) ficaram evidentes a feição sedimentar *swash bar* (barras arenosas) a barlar da embocadura do CSC (Figura 6b,c,d). Nesse caso, atribui-se a sua formação como resultante do processo de molhe hidráulico na desembocadura do CSC, que barra a deriva litorânea. As estruturas sedimentares *swash bar* e sua migração representam uma importante característica morfodinâmica, vista como um mecanismo de progradação, em curto prazo, próximo à embocadura (Toldo & Dillenburg, 2001).

Na Figura 7 são apresentados os resultados da aplicação de operadores direcionais de Prewitt, na banda1 (450-520 nm) do satélite IKONOS, rastreada em 14/12/2005. É importante ressaltar, que o nível das marés, no instante do rastreamento das imagens IKONOS e SPOT5, é distinto. Essa análise foi feita baseando-se nas tábuas de maré, onde foi constatado que a imagem IKONOS foi tomada, no estágio de enchente, com o nível do mar mais elevado que a imagem SPOT5.

Dessa forma, diferentes datas, regimes de maré e períodos sazonais de rastreamento de imagens de satélite, podem levar a identificação de possíveis diferenciações ou alterações ocorridas nas feições de fundo, quando comparadas.

Nas filtragens da imagem IKONOS também são observadas as feições sedimentares de bancos transversais de areia, em ambas as margens do rio Timbó, assim como os depósitos sedimentares *swash bar*. As feições *sand waves* ficaram menos acentuadas que na imagem SPOT5, provavelmente devido ao nível mais elevado do mar, no momento do rastreamento do satélite.

Observa-se na imagem IKONOS (2005) da Figura 7(d) o crescimento de uma feição deposicional sedimentar paralela à costa (banco de areia paralelo à costa), em relação à imagem SPOT5 (2003). A partir da análise dos dados obtidos *in situ* (capítulo 5), esta formação está associada à direção do fluxo da circulação residual no rio Timbó, que aponta em direção ao Norte, no período seco.

O uso de operadores direcionais em imagens de satélite fornece feições de base, que são melhores representadas em direções específicas, devido ao destaque batimétrico observado. Assim, é necessário que se tenha em foco o objetivo específico a ser avaliado. Dessa forma, o conjunto de direções das máscaras pode auxiliar, apresentando melhor acuidade, na diferenciação das feições e eventualmente redimir alguma dúvida sobre essas formações sedimentares.

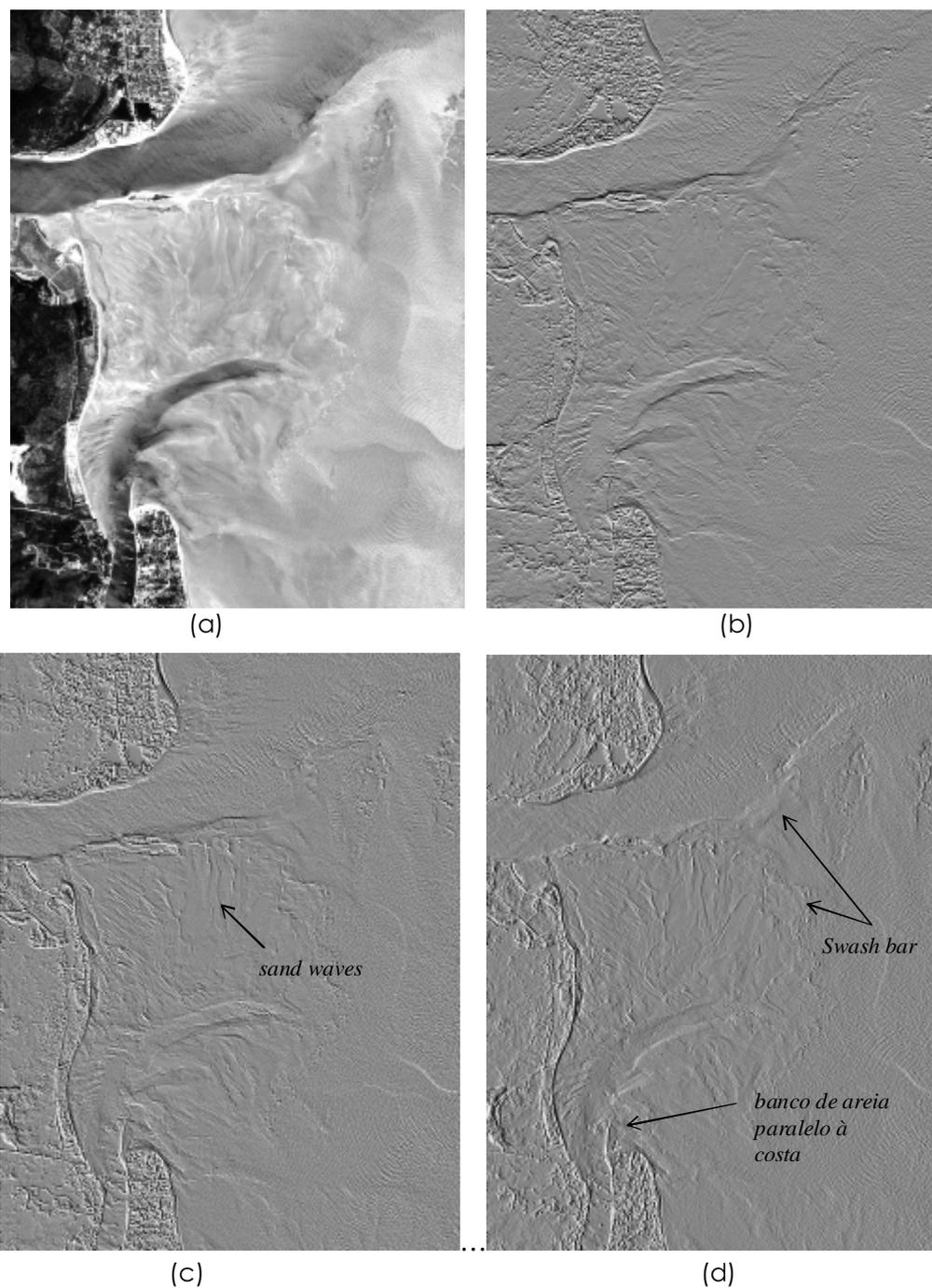


Figura 7 – (a) Imagem original do satélite IKONOS, banda1 (450-520 nm), de 14/12/2005. Resultados da aplicação das máscaras direcionais Prewitt na imagem IKONOS: (b) 0°; (c) 45°; (d) 90°.

LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO

O levantamento das cotas batimétricas do segmento de costa entre a Coroa do Avião e a foz do rio Timbó foi realizada em janeiro de 2007, com o objetivo de elaborar o modelo digital de elevação (MDE), para fundamentar as interpretações das

feições de fundo, geradas por operadores direcionais. Os dados batimétricos poderão não apenas corroborar os resultados extraídos das imagens filtradas, mas também fornecer dados distintos das feições sedimentares, tais como, altura das ondulações e depósitos sedimentares e profundidade dos canais.

Os perfis batimétricos, ilustrados na Figura 8, representam 7.600 pontos amostrais que foram levantados em profundidades variando entre 0,80 m e 5,0 m, utilizando-se uma ecossonda GPSMAP 298. Esta etapa foi realizada durante o estágio de preamar, devido as melhores condições de navegabilidade.

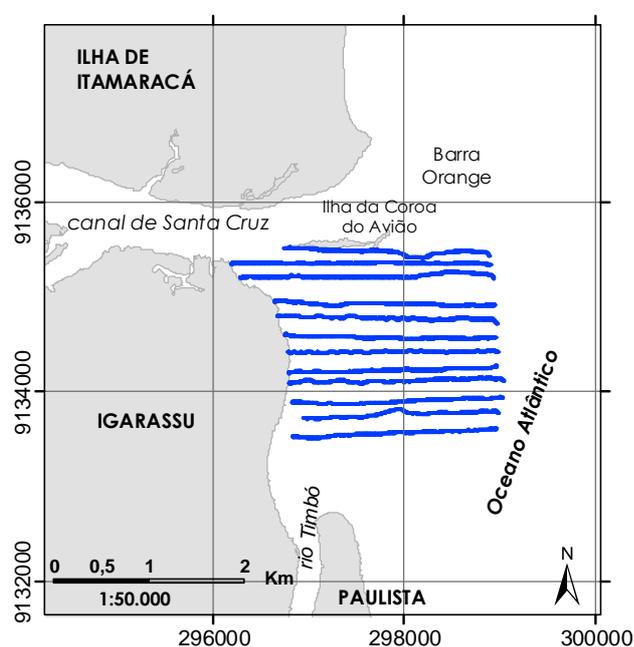


Figura 8 – Localização espacial dos perfis batimétricos

O modelo digital de elevação (MDE), ilustrado na Figura 9, foi gerado utilizando o método de interpolação de krigagem ordinária. Apesar do levantamento *in situ* (jan/2007) não coincidir com a data do rastreamento do satélite (jun/2003), foram feitos cortes no MDE que se mostraram, em princípio, compatíveis quando comparados à imagem filtrada.

Os perfis batimétricos, representativos dos cortes realizados no MDE, estão indicados na Figura 10. A análise dos gráficos demonstra que, apesar da compatibilidade dos resultados entre algumas feições de fundo, as informações extraídas das imagens filtradas apresentaram-se melhor definidas que às obtidas pela batimetria. Principalmente, quando se trata de feições menores e mais refinadas.

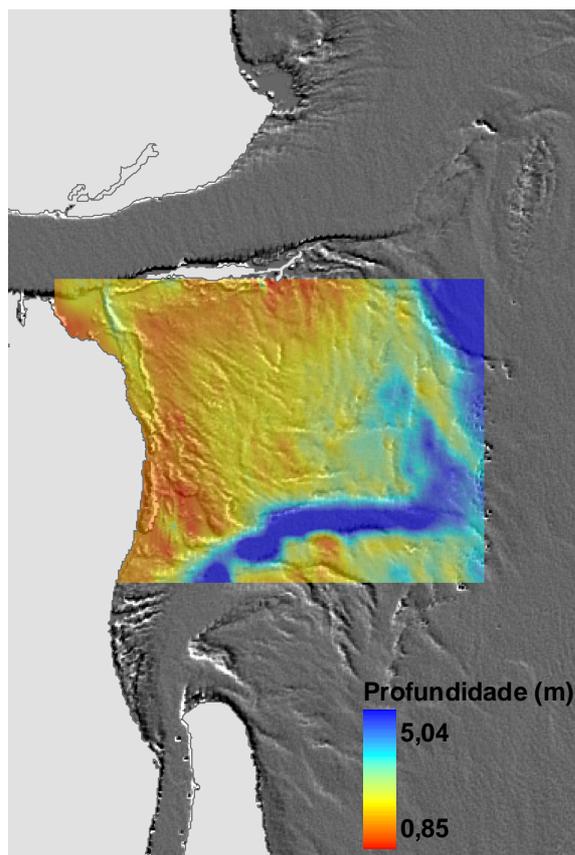


Figura 9 – Modelo Digital de Elevação (MDE), sobreposto à imagem filtrada (direcional Prewitt 45°).

Entretanto, é preciso salientar que Informações sobre altura, assimetria, espaçamento entre cristas das feições só podem ser obtidas desses perfis batimétricos e são importantes para fundamentar as interpretações das formas de fundo obtidas das imagens filtradas. Contudo, medidas de comprimento, largura, cálculo das áreas e perímetros dessas feições, bem assim do próprio espaçamento, podem ser extraídas diretamente das imagens filtradas georreferenciadas.

Portanto, o levantamento batimétrico deve ser realizado com bastante precisão e menor espaçamento possível, para que seja possível identificar feições que mais se aproximam das fornecidas pelas imagens filtradas, considerando, obviamente, a relação custo X benefício.

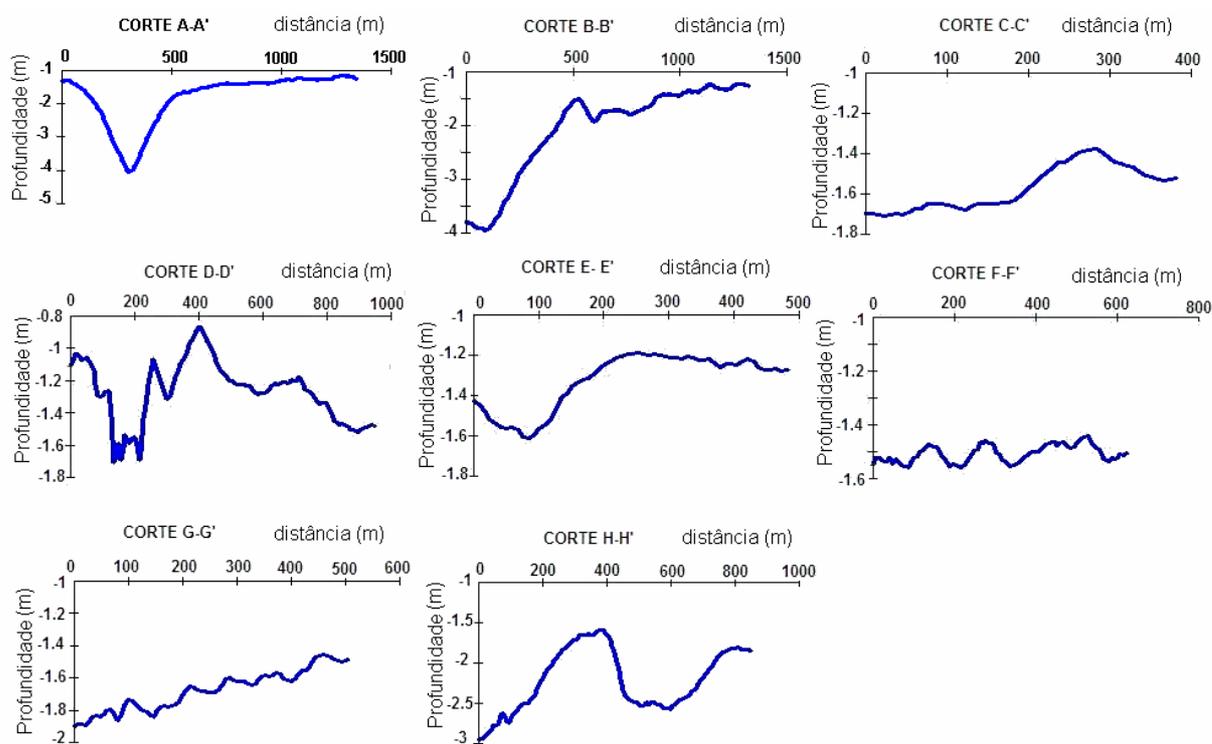
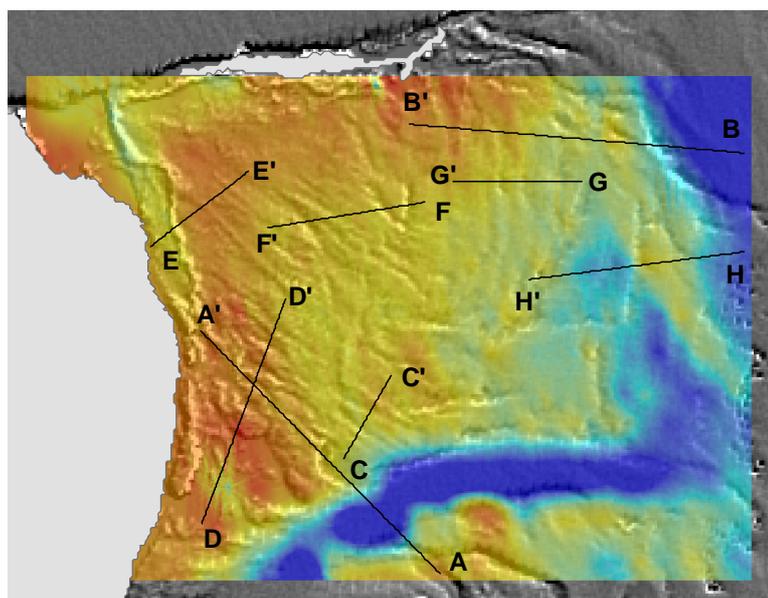


Figura 10 – Perfis batimétricos (A-A'; B-B'; C-C';D-D'; E-E'; F-F'; G-G'; H-H') obtidos a partir de cortes realizados no MDE.

CONCLUSÃO

A técnica de processamento de imagens, que utiliza filtros direcionais baseados em derivadas parciais para detecção de bordas, possibilitou a identificação de feições deposicionais em águas costeiras rasas. Entretanto, para a seleção de um determinado algoritmo, é necessário compreender a natureza da feição que será realçada.

Os resultados de operadores direcionais Prewitt (*Compass-gradient*) forneceram feições de estruturas sedimentares, importantes para o entendimento da hidrodinâmica que influencia nos processos de transporte e deposição de sedimentos. As aplicações de máscaras direcionais de Prewitt, em direções pré-estabelecidas, forneceram feições que ocorrem perpendicularmente à direção especificada. Dessa forma, é possível identificar a direção na qual a forçante, responsável por uma determinada formação sedimentar, está atuando. Ou seja, interpretar as feições submersas associadas à hidrodinâmica.

As feições sedimentares extraídas de imagens filtradas representam informações importantes que poderão contribuir para a navegação, planejamento de obras costeiras e modelagem da hidrodinâmica.

REFERENCIAS

- AMARAL, R. F.; LIMA, A. T.; ASSIS, H. M. B. DE & MANSO, V. A. V. 1989. Estudo do comportamento atual da linha de costa entre as desembocaduras do rio Timbó e do canal Santa. Cruz. Boletim – Paulista-PE-II. In: Congresso Brasileiro de Geologia 36. Natal. V. (2), p. 676-689.
- ASHLEY, G. M. 1990. Classification of Large-Scale Subaqueous Bedforms: A New Look at an Old Problem, *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol 60, pp 363-396.
- AWCOCK, G. J. & THOMAS, R. 1996. Applied image processing. New York: McGraw-Hill. ISBN: 0070014701.
- CHAVES, N. S. 1996. Beachrocks do Litoral Pernambucano: Estudo Sedimentológico e Análise de Isótopos Estáveis. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 80 p.
- CHAVES, N.S. 2000. Mecanismo de cimentação em sedimentos marinhos recentes, exemplo beachrocks do litoral pernambucano. Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista-UNESP, Campus Júlio de Mesquita, Rio Claro, 216p.
- GONZALEZ, R. C. & WOODS, R. E. 2002. Digital image processing. 2nd ed. Upper Saddle River (NJ): Prentice Hall. ISBN: 0201180758.
- HAYES, M. O. 1979. Barriers island morphology as a function of tidal and wave regime. Leatherman, S.P. (Ed.), Barrier Island from the Gulf of Mexico. Academia Press, New York.
- MAINI, R. & SOHAL, J. S. 2006. Performance evaluation of Prewitt edge detector for noisy images. *GVIP Journal*, Volume 6, Issue 3. www.icgst.com.
- MARTINS, M. H. A. 1997. Caracterização morfológica e vulnerabilidade do litoral da Ilha de Itamaracá – PE. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. 104 p.
- MENDONÇA, F. J. B. 2005. Posicionamento de alta resolução: adequação e aplicação à morfologia costeira. Tese doutorado. Universidade Federal de Pernambuco. 94 f.
- PREWITT, J. M. S. 1970. Object enhancement and extraction. In: Picture Processing and sychopictorics, B. S. Lipkin and A. Rosenfeld, eds. New York: Academic Press, pp. 75-149.
- REINECK, H. E. & SINGH, I. B. 1980. Depositional sedimentary environments. 2nd ed. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, New York.
- SÁ, L. A. C. M. de. 2001. Modelagem de dados espaciais para sistemas de informações geográficas – pesquisa na emergência médica. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 87p.
- THE OPEN UNIVERSITY. 1998 The Ocean Basins: Their Structure and Evolution. Open University Course Team, 2nd edn. Milton Keynes, UK. p.192
- TOLDO, E. E., JR & DILLENBURG, S. R. 2001. Swash bar Migration at the inlet of the Lagoa dos Patos, Brazil. *Journal of Coastal Research Special Issue 34*, (ICS 2000 New Zeland). ISSN 0749-0208.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

O objetivo principal desta tese foi desenvolver e aplicar metodologias que contribuam para o entendimento dos processos costeiros ao sul de Itamaracá, Brasil.

Uma das razões que levou ao desenvolvimento deste estudo decorre do fato de que a zona costeira de Itamaracá se apresenta como um ambiente extremamente dinâmico, no qual interagem os processos costeiros que alteram constantemente suas características. Por outro lado, os processos que causam essas mudanças são provenientes de ações antrópicas e de fenômenos naturais que agem continuamente ao longo do tempo e espaço.

Assim, com a finalidade de atingir o objetivo proposto, ao mesmo tempo em que venha suprir a ausência de dados hidrodinâmicos na área de pesquisa, foram desenvolvidos estudos, os quais resultaram em conclusões que serão apresentadas a seguir.

A primeira etapa buscou identificar e determinar a distribuição dos manguezais do Sistema Estuarino de Itamaracá, bem como detectar e analisar suas mudanças ao longo do tempo, a partir das tecnologias de sensoriamento remoto e SIG. De acordo com os resultados obtidos, verifica-se que:

- A metodologia proposta, que utiliza sensores remotos ópticos passivos e Sistemas de Informação Geográfica (SIG), é adequada para a identificação, mapeamento e análise espacial dos manguezais, sendo, portanto indicada para monitorar conformidades com

Ana Regina Lima Uchôa de Moura

os acordos ambientais internacionais, tais como o estabelecido pela Convenção Ramsar (1971).

- O processo de classificação supervisionada (MaxVer) em imagens multiespectrais dos satélites SPOT/HRV e Landsat7/ETM+, para a identificação das feições do manguezal, apresentou bom desempenho em termos qualitativos e quantitativos, confirmados pelos elevados valores do coeficiente kappa e da exatidão global: 0,97 e 98,56% (ETM+) e 0,95 e 97,38% (SPOT), respectivamente.
- Foi comprovado o desflorestamento do manguezal e verificado impacto negativo em relação à distribuição sedimentar no braço sul do CSC. A atividade de carcinicultura foi apontada como um dos vetores responsáveis pelo desmatamento.

Em seguida propôs-se a estudar a circulação, os parâmetros termohalinos e o efeito de molhe hidráulico ao sul de Itamaracá, onde se verificou que:

- A temperatura e a salinidade da camada superficial no braço sul do CSC, praticamente não apresentaram variação espacial no final do ciclo. Entretanto, foi observada uma variabilidade sazonal para esses parâmetros, apresentando menores valores no período chuvoso.
- A temperatura ao longo da coluna d'água se manteve constante em todas as estações amostrais, da superfície ao fundo, durante os períodos seco e chuvoso. A classificação de acordo com a estratificação da salinidade resultou em um estuário "bem misturado", para ambos os períodos.
- A direção da circulação residual no CSC seguiu em direção a jusante, no período seco (jan/2007) e em direção a montante, durante o período chuvoso (jul/2007), indicando tendências de formação de feições sedimentares.
- No período seco, a circulação residual rio Timbó seguiu em direção ao norte, onde foi observado formação de banco paralelo à costa. Durante o período chuvoso a resultante da circulação seguiu em direção a leste, indicando a tendência de formação de bancos transversais à costa.
- As intensidades das correntes medidas e a vazão calculada nas seções transversais no CSC e rio Timbó, comprovaram cientificamente a existência de um **molhe hidráulico** na desembocadura do CSC, que funciona como uma barreira à deriva litorânea.

Por fim, a terceira etapa objetivou testar e avaliar o uso de operadores direcionais para extrair as feições de base (fundo), em águas costeiras rasas, a partir de

imagens de satélite. Foi concluído que:

- A técnica de processamento de imagens, que utiliza filtros direcionais (*Compass-gradient*) baseados em derivadas parciais para detecção de bordas, possibilitou a identificação de feições de base em águas costeiras rasas.
- Aplicações de máscaras direcionais de Prewitt em imagens dos satélites SPOT5 e IKONOS, que abrange as faixas espectrais do azul (450 – 520 nm) e do verde (520-600 nm), forneceram informação sobre feições de base que ocorrem perpendicularmente à direção pré-estabelecida da máscara.
- As feições sedimentares, identificadas nas imagens de satélites, constituem importantes informações que poderão contribuir para o entendimento dos processos de transporte e deposição de sedimentos associados à hidrodinâmica local.

Os resultados obtidos neste estudo confirmaram a hipótese de que a destruição dos manguezais e a hidrodinâmica estão contribuindo para as alterações do padrão e forma de deposição sedimentar, ao sul da ilha de Itamaracá, possibilitando a compreensão dos processos costeiros que alteram constantemente suas características. Além disso, foi possível concluir que o uso de dados obtidos por sensores remotos ópticos passivos e por medições *in situ* contribuiu, de forma eficaz, para identificar e analisar os processos dinâmicos e feições de fundo na Zona Costeira de Itamaracá.

RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

As conclusões aqui expostas são específicas e, por óbvio, não se esgotam em si. Por outro lado, podem servir de incentivo à continuidade desse estudo, com a aplicação e desenvolvimento de outros métodos que contribuam para a compreensão dos processos atuantes nas Zonas Costeiras. Dessa forma, como proposta de estudos futuros, recomenda-se:

- A realização de um levantamento hidrodinâmico considerando uma malha mais refinada.
- A modelagem matemática dos dados de corrente, obtidos nesse estudo, com o objetivo de simular o comportamento da circulação nas regiões onde não puderam ser

realizadas medições de corrente. Os resultados poderão indicar as áreas que favorecem a deposição de sedimentos.

- O monitoramento contínuo do ecossistema manguezal por meio de imagens de satélite. É indicado que sejam inseridas novas variáveis na avaliação dos impactos causados aos manguezais. Nesta pesquisa utilizou-se imagem datada de 2001 e, naquele período, o atributo fazenda de camarão era considerado o fator mais impactante.
- Desenvolvimento de estudos integrados relacionados à dinâmica sedimentar e à hidrodinâmica para um entendimento mais amplo das alterações ocorridas nas zonas costeiras. Existe uma gama de estudos sobre a dinâmica sedimentar que ressaltam a necessidade de dados hidrodinâmicos e hidrológicos, que possam corroborar e complementar seus resultados.
- Uma interessante via para a continuidade deste estudo está associada à investigação das interações entre a circulação superficial, a pluma de material em suspensão e a batimetria com o objetivo de relacioná-los a dados quali-quantitativos referentes à biota marinha, a partir do uso de sensoriamento remoto e medidas *in situ*.
- Por fim, recomenda-se que seja estruturada uma Base de Dados Espaciais que possibilite a integração de dados e informações oriundas de estudos distintos, visando à realização de análise espacial com um objetivo específico. A estruturação dessa Base de Dados é de fundamental importância para a gestão integrada da Zona Costeira de Itamaracá.

REFERÊNCIAS

- AMARAL, R. F.; LIMA, A. T.; ASSIS, H. M. B. DE & MANSO, V. A. V., 1989. Estudo do comportamento atual da linha de costa entre as desembocaduras do rio Timbó e do canal Santa. Cruz. Boletim – Paulista-PE-II. In: Congresso Brasileiro de Geologia 36. Natal. V. (2), p. 676-689.
- BARBOSA, C. C. A.; SILVA, H. A.; SÁ, L. A. C. M. DE & PORTUGAL, J. L., 2008. Base de dados espaciais aplicada a erosão costeira. II Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Recife, 8-11 set. de 2008.
- BEER, T., 1983. Environmental Oceanography: An Introduction to the Behaviour of Coastal Waters. Great Britain: Wheaton & Co. Ltd. 261p.
- BILLS, B. G.; BORSA, A. A. & COMSTOCK, R. L., 2007. MISR-based passive optical bathymetry from orbit with few-cm level of accuracy on the Salar de Uyuni, Bolivia. Remote Sensing of Environment 107. pp.240-255.
- BRASIL. Lei nº 4.771, de 15 de setembro de 1965. Institui o novo Código Florestal. Disponível em: <<http://www.planalto.gov.br/CCIVIL/LEIS/L4771.htm>>. Acesso em: 11 jun. 2009.
- BROCE, B.S., 1993. Importação e exportação de carbono orgânico de forma particulada através da barra sul do canal de Santa Cruz, Itamaracá-PE, Brasil. 74f. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Biológica) – Centro de Tecnologia e Geociências. Universidade Federal de Pernambuco. Recife.
- BURROUGH, P. A., 1986. Principles of Geographic Information Systems for Land resources Assessment. Oxford University Press, 315p.
- CAMPBELL, K., 2002. Remote Sensing. In: (El-Shaarawi e Piegorsch). Encyclopedia of Environmetrics. Ed. John Wiley & Sons, Ltd. pp.1744-1754
- CERPCH. Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas. Disponível em: <<http://www.cerpch.unifei.edu.br/equipamentos.htm>>. Acesso em: 14 jun. 2007.
- CHAVES, N.S. 2000. Mecanismo de cimentação em sedimentos marinhos recentes, exemplo *beachrocks* do litoral pernambucano. Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista-UNESP, Campus Júlio de Mesquita, Rio Claro, 216p.
- CLARK, J. R., 1995. Management Strategies. In: Coastal Zone Management Handbook. Lewis Publishers. pp.1-7.
- CMA. Centro Nacional de Pesquisa, Conservação e Manejo de Mamíferos Aquáticos. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/cma/index.php?id_menu=0> Acesso em: 08 jun. 2007.
- CPRH. AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS. Diagnóstico Socioambiental do Litoral Norte de Pernambuco. Recife-PE, 2001.
- GHERARDI, F. M. & CARVALHO, M., 2005. Utilização de Imagens Orbitais para a Conservação e Gestão Ambiental da Zona Costeira. In: SOUZA R. B. Oceanografia por Satélites. São Paulo: Oficina de Textos. pp.259-273.
- ESKINAZI-LEÇA, L. & BARROS, H. M., 2000. Síntese global e recomendações. In: BARROS, H. M. *et al.* Gerenciamento participativo de estuários e manguezais. Recife: Universitária, UFPE, pp.239-252.

Referências

- FERNANDES, M.A.A., 1997. Produtividade fitoplanctônica relacionada com alguns aspectos ecológicos no estuário do rio Congo (Itapissuma-Pernambuco). 180f. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Biológica) Departamento de Oceanografia. Centro de Tecnologia e Geociências Universidade Federal de Pernambuco, Recife.
- KAMPEL, M., 2002. Sensoriamento Remoto Aplicado à Oceanografia. INPE (6).
- KAMPEL, M. E NOVO, E. M. L. M., 2005. O Sensoriamento Remoto da Cor da Água. In: SOUZA R. B. Oceanografia por Satélites. São Paulo: Oficina de Textos. pp.180-196.
- KOMAR, P. D., 1973. Computer models of delta growth due to sediment input from rivers and longshore transport. Geol. Soc. Amen. Bulletin. 84: 2217-2226.
- KRUG, L. & NOERNBERG, M. A., 2005. Extração de batimetria por Sensoriamento Remoto de áreas rasas dos Sistemas Estuarinos do Estado do Paraná, Brasil. XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia. pp.3077-3084.
- LYRA-NEVES, R. M. DE; AZEVEDO JÚNIOR, S. M. DE & TELINO-JÚNIOR, W.R., 2004. Monitoring of the sanderting, *Calidris alba* (Pallas) (Aves, Scolopacidae), across recuperations of color band, in the Coroa do Avião, Pernambuco State, Brazil. Rev. Bras. Zool., June 2004, vol.21, no.2, p.319-324. ISSN 0101-8175.
- LYZENGA, D. R., 1978. Passive Remote Sensing Techniques for Mapping Water Depth and Bottom Features. Applied Optics, Vol. 17, 3. pp. 379-383.
- MANSO, V .A. V.; LIMA FILHO, M. F. & OLIVEIRA, A. T., 1992. Macrozoneamento Costeiro do litoral de Pernambuco – Folha Itamaracá – SB.25-Y-C-VII. Relatório técnico. Recife. Laboratório de Geologia e Geofísica Marinha (LGGM). Departamento de Engenharia de Minas-UFPE.
- MARRONI, E.V. & ASMUS, M. L., 2005. Gerenciamento Costeiro: uma proposta para o fortalecimento comunitário na gestão ambiental. Pelotas: USEB. 149p.
- MELSHEIMER, C. & LIEW, S. C., 2001. Extracting Bathymetry from Multi-Temporal SPOT Images. 22nd Asian Conference on Remote Sensing. Singapore.
- MORAES, A.C.R., 1999. Contribuições para a Gestão da Zona Costeira do Brasil: Elementos para uma Geografia do Litoral Brasileiro. Ed. Hucitec Edusp, São Paulo, 229p.
- MOURA, A. R. L. U., 2004. Utilização das técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento como instrumentos para gestão ambiental das áreas estuarinas do canal de Santa Cruz e rio Jaguaribe. Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco, PUBLIC2/FACEPE (n.23-CEN-08/00-01/01), 118 pp.
- PARENTE, C. L.; VERGARA-PARENTE, J. E. & LIMA, R. P., 2004. Strandings of Antillean Manatees, *Trichechus Manatus Manatus*, in Northeastern Brazil. LAJAM 3(1): 69-75, January/June 2004. ISSN 1676-7497. Disponível em: <http://www.seaturtle.org/PDF/Parente_2004_LAJAM.pdf> Acesso em: 08 jun. 2007.
- PASSAVANTE, J. Z. O., 1979. Produção primária do fitoplâncton do Canal de Santa Cruz (Itamaracá-Pernambuco). São Paulo, Tese em Oceanografia Biológica. Instituto Oceanográfico, USP, 188p.
- PHILPOT, W. D., 1989. Bathymetric Mapping with Passive Multispectral Imagery. Applied Optics, 27 (8). pp.1569-1578.
- Programa REVIZEE. Programa de Avaliação do Potencial Sustentável de Recursos Vivos da Zona Econômica Exclusiva.
- Projeto Orla., 2004. Subsídios para um projeto de gestão / Brasília: MMA e MPO, (Projeto Orla), 104 p.

Referências

- RAMSAR CONVENTION, 1971. Available in: <<http://www.ramsar.org>>. Access in 18 set. 2007.
- Ratisbona, L. R. 1976. The climate of Brazil. Vol 12. In: Schwerdtfeger W (ed) World survey of climatology – climates of Central and South America. American Elsevier, New York, pp 219-293.
- RD INSTRUMENTS, 2003 – Technical Note: RDI's Bottom-Tracking. RD Instruments, San Diego.
- ROBINSON, I.S., 1985. Satellite Oceanography – an introduction for oceanographers and remote-sensing scientists. Chichester: Ellis Horwood Ltd.
- SÁ, L. A. C. M. de., 2001. Modelagem de dados espaciais para sistemas de informações geográficas – pesquisa na emergência médica. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 87p.
- SAENGER, P., HEGERL, E. J. & DAVIE, J. D. S., 1983. Global status of mangrove ecosystems. The Environmentalist 3 (supplement 3).
- SALGUEIRO, J. H. P. DE B. & MONTENEGRO, S. M. G. L., 2008. Análise da distribuição espacial da precipitação na bacia do rio Pajeú em Pernambuco segundo método geoestatístico. Revista Tecnologia, v.29, n.2. p. 174-185.
- SCHAEFFER-NOVELLI, Y., 1999. Avaliação e ações prioritárias para a conservação de biodiversidade da zona costeira e marinha: grupo de ecossistemas, manguezal, marisma e apicum. Relatório de consultoria. São Paulo. 64p.
- SeaWiFS Project. Disponível em <<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/SeaWiFS/>> Acesso em: 04 jun. 2007.
- SILVA, L. A., 2004. Sedimentologia do canal de Santa Cruz – ilha de Itamaracá-PE. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 97 p.
- SILVA, J. D. V., 1995. Parâmetros Oceanográficos e distribuição das espécies e bosques de mangue do estuário do rio Paripe-PE. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil.
- SIMPSON, M.R. E OLTMANN R.N., 1993. Discharge-Measurement System Using an Acoustic Doppler Current Profiler with Applications to Large Rivers and Estuaries - United States Geological Survey Water-Supply Paper 2395.
- SUGUIO, K., 1992. Dicionário de geologia marinha: com termos correspondentes em inglês, francês e espanhol. São Paulo: T.A. Queiroz Editor. 170 p.
- THE OPEN UNIVERSITY., 1998 The Ocean Basins: Their Structure and Evolution. Open University Course Team, 2nd edn. Milton Keynes, UK. p.192
- TIAGO FILHO, G. L., VIANA, A. N. C., CAETANO, G. T. & SANTOS, R. M.R. M., 1999. Uso do ADCP em Pequenos e Médios Cursos D'Água. In: 5ª Reunión del Grupo de Trabajo de Hidromecânica, Montevideo, 11-14 de mayo 1999. Anais do 5ª Reunión del Grupo de Trabajo de Hidromecânica. Montevideo, Uruguay.
- TSAI, F. & PHILPOT, W. D., 1998. Derivative Analysis of Hyperspectral Data. Remote Sensing of Environment, 66(1): pp.41-51.
- VAN RIJN, L.C., 1984. Sediment transport: Part I: Bed load transport; Part II: Suspended load transport; Part III: Bed forms and alluvial roughness. Journal of Hydraulic Division 110 (10), 1431– 1456; 110 (11) 1613– 1641; 110 (12) 1733-1754.
- VAN RIJN, L.C., 1993. Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas. Aqua Publication, The Netherlands, Amsterdam.