

Análise multitemporal da linha de costa do município de Acaraú – Ceará – Brasil

Maria Valdirene Araújo^{1,2}

¹ Universidade Federal de Pernambuco - UFPE
Avenida Acadêmico Hélio Ramos s/n, Cidade Universitária – Recife – Brasil
mmvvaall@hotmail.com

² Universidade Federal do Ceará - UFC
Av. Humberto Monte, s/n – Fortaleza – Ceará - Brasil

Abstract. This work embraces the application of Landsat 5 TM digital images, comprising July 7 1987, June 10 1991, July 2 1999 and August 11 2008, for temporal mapping of littoral east of Acaraú, situated in the Ceara region. After treatment using several digital processing techniques (e.g. colour composition in RGB, ratio of bands, principal component analysis, index methods, among others), it was possible to generate several image products and multitemporal maps of the coastal morphodynamics of the studied area. This report had as objective the multitemporal environmental monitoring of the region by recognizing in the field and analyzing images of orbital sensors of different years of last two decades. This analysis was achieved by Digital Images Processing (DIP) techniques. Using the image products it was possible the identification and characterization of the principal elements in the surface of the studied area, associating the spectral characteristics of these elements to that presented by the image products resulting of the digital processing. Thus, it was possible to identify the sea/land limit, shallow submersed areas and suspended sediments. The multitemporal maps of the coastal morphology allowed the identification and evolution of regions which were submitted to erosive and constructive processes in the last two decades.

Palavras-chave: remote sensing, image processing, geology, sensoriamento remoto, processamento de imagens, geologia.

1. Introdução

A zona costeira, região onde o continente encontra o mar, constitui uma zona de fronteira sujeita a contínuas alterações morfodinâmicas, modeladas por processos de origem continental e marinha. Apresenta grande variabilidade temporal e espacial, comportando-se como um sistema ambiental instável, desde o passado remoto até os dias atuais, em função de uma série de processos geológicos continentais e marinhos, muito mais dos quais são fundamentalmente controlados por fatores meteorológicos. Esses processos, determinantes na formação de distintos tipos de costas, englobam oscilações do nível do mar e dinâmica erosiva e deposicional associada à ação das ondas, marés, correntes e dinâmica eólica. (Baptista et al. 2004).

A área objeto deste trabalho situa-se no Extremo Norte do Estado do Ceará, limitado pelas coordenadas UTM WGS84 24S (350000 – 395000 E) e (9690000 – 9685000 N), (Figura 1). Essa área corresponde a uma região que sofreu ao longo dos anos processos erosivos e deposicionais bem marcantes por apresentar uma morfologia costeira instável e caracterizada por pontais arenosos, que atingem de 8 km a 6 km e que normalmente são estreitos (> 1 km).

Ainda conforme Baptista Neto et al. (2004) dentre os diversos ambientes de sedimentação continentais e marinhos, ocorrem aqueles diretamente localizados na linha de costa, como as praias, os pontais arenosos, estuários, deltas, lagunas e dunas eólicas costeiras. Estes ambientes são altamente mutáveis em função de sua localização geográfica na interface continente oceano, sendo constantemente remobilizados pela ação dos processos costeiros associados às ondas, correntes e marés e ao aporte de sedimentos.

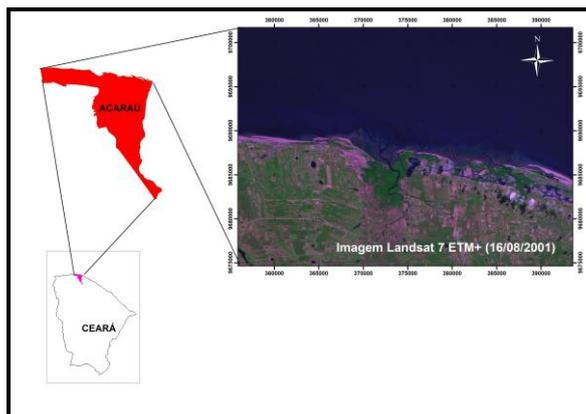


Figura 1 – Localização da área.

1.1 Contexto Geológico

Formação Barreiras

A Formação Barreiras ocorre na área em uma faixa contínua de norte a sul em subsuperfície. Apresenta-se como pacote de material areno-argiloso de coloração vermelha a creme amarelada, níveis caulínicos, com acamamento não distinto e intercalações de leito de granulometria mais grossa conglomerática. Em quase toda sua extensão apresenta-se coberta por areias claras que podem atualmente ser referidas como retrabalhamento da Formação Barreiras (Figura2).

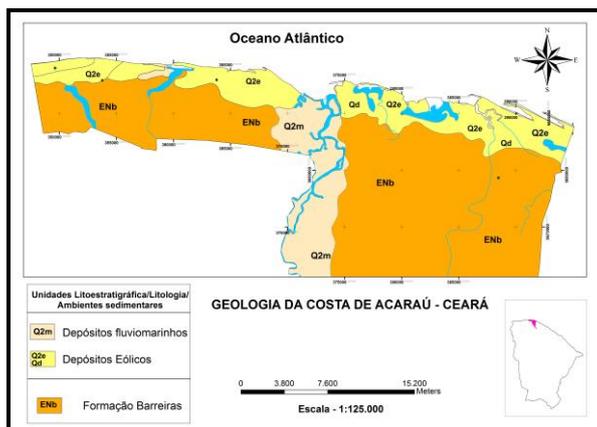


Figura 2 – Aspectos geológicos da área. Adaptado (CPRM, 2003).

Depósitos fluviomarinhos

Próximo aos estuários a ação fluvial se combina com a marinha contribuindo para a formação de planícies fluviomarinhas que agrupam ecossistemas de manguezais e vales fluviais subordinados às oscilações das marés. De acordo com Pinheiro (2006) a evolução desses sistemas, em larga escala, está diretamente associada às flutuações do nível médio do mar ao longo do Quaternário.

Os depósitos fluviomarinhos são representados, essencialmente, por sedimentos síltico-argilosos, por vezes, ricos em matéria orgânica, podendo desenvolver vegetação de mangue.

A área estuarina do rio Acaraú corresponde a um sistema complexo com drenagens de padrões anastomosados, geomorfologicamente se destaca pela sua planície fluviomarinha e de maré. Essa planície concentra uma das maiores áreas de manguezais do estado do Ceará. São feições bastante impactadas, pois a ocupação dessa região teve início com o povoado de Acaraú. Atualmente, os impactos são maiores devido à expansão de atividades econômicas, principalmente, a carcinicultura, no litoral leste de Acaraú.

Depósitos eólicos

A planície litorânea caracteriza-se pela presença de dunas fixas e móveis que formam extensos cordões paralelos à praia. Do ponto de vista ambiental essas feições são bastante vulneráveis à ação do homem.

As dunas acompanham a linha de costa e estão dispostas ora sobre os tabuleiros, ora sobre Terraços marinhos holocênicos. Na área apresentam gerações dunares de três gerações, móveis, semi-fixas e fixas

As citadas gerações de dunas estão relacionadas a variações relativas de nível do mar e mudanças climáticas durante o período geológico mais recente. Sua formação decorre do aporte de areias provenientes da Plataforma Continental e das praias onde são formadas por areias finas transportadas pelo vento e pelas águas.

1.2 Condições oceanográficas

Ventos

Os dados de ventos estão de com a estação anemográfica encontra-se implantada na localidade de Pecém no município de São Gonçalo do Amarante – CE no ano de 2002. As velocidades médias dos ventos variam de 3,4 a 9,57m/s, com média de 6,79m/s. As direções dominantes e reinantes, foram de Leste, representando 46,3% das medidas, seguida das direções ENE com 22,3% e ESE com 16,0 % das ocorrências. Os ventos que sopraram do quadrante norte (NNW, N e NNE), corresponderam a 5,1 % do total das ocorrências registradas no período e na sua maioria de baixa intensidade. (INPH, 2001).

Correntes

As correntes costeiras são responsáveis pelo transporte de sedimentos atingindo a costa em um determinado ângulo. A angulosidade de incidência dessas correntes é muito importante no transporte de sedimentos e na deposição, pois este setor determina sua velocidade e portanto a trajetória dos sedimentos (SILVA, 2005).

De acordo com Freire (1985) durante a realização da operação GEOMAR XVIII foram realizadas quatro estações de correntometria, uma delas, localizada na plataforma interna próxima a foz do rio Coreaú, na qual apresenta uma corrente geral com velocidade na ordem de 0,24 m/s e direção 238°N na superfície e 0,21 m/s com direção de 87°N no fundo.

Marés

As marés são importantes ondas dos oceanos, ocorrendo um levantamento e um abaixamento rítmico sobre um intervalo de tempo de várias horas, traduzindo-se pela oscilação periódica do nível do mar, com período e amplitude variáveis no tempo e no espaço, devido à atração gravitacional da Terra, Lua e Sol sobre as águas. Esta oscilação é acompanhada por correntes de marés (horizontais), nas quais seu limite e sua intensidade variam igualmente no tempo e no espaço observados (CHAVES, 2000 *apud* SILVA, 2005).

O litoral de Acaraú localiza-se numa região de mesomaré representada por marés semi-diurnas que de acordo com Freire (1985) as marés do Estado do Ceará podem ser classificadas por ondas semi-diurnas com desigualdade de amplitude e com período médio de 12,4 horas.

Ondas

A distribuição de sedimentos que modificam o contorno das praias é principalmente influenciada pelo movimento das ondas que atuam como o principal agente modelador das zonas costeiras (SILVA, 2005).

A análise das ondas para o período de 1997 a 2001 de acordo com INPH (2002), para as classes de $1,9 \text{ m} \leq H_{\text{max}} \leq 2,0\text{m}$ foi a mais freqüente, com 7,2 %; segue-se a classe de $1,8 \text{ m} \leq H_{\text{máx}} < 1,9 \text{ m}$, com 7,10%. A classe de $4,6\text{m} \leq H_{\text{máx}} \leq 4,7\text{m}$ ocorreu com 0,02%, o que indica que ocorreram 4 ondas em 1705 dias. O grupamento de $1,3\text{m} < H_{\text{máx}} < 3,2\text{m}$ ocorreu com 93,06% de freqüência. Ondas máximas 4,0m ocorreram com freqüência de 0,2% o que

representa 34 dias em 1705 dias; ondas máximas acima de 3,0 ocorreram com 9,83% e ondas máximas acima de 2,0 ocorreram com 61,66%.

2. Metodologia

Nos procedimentos metodológicos foram coletados dados bibliográficos e cartográficos com enfoque na temática do trabalho, que abordassem assuntos específicos sobre SIG e PDI, enfocando metodologias de integração de dados *raster*, vetoriais e alfanuméricos.

Para a análise multitemporal da evolução da linha de costa foram utilizadas imagens orbitais Landsat 5 TM com quatro datas distintas (obtidas gratuitamente no site do INPE) através de técnicas de realce no PDI. Essa análise permitiu o levantamento da linha de costa em diferentes anos, onde os intervalos variaram de 4 anos a 9 anos. (Quadro 1).

Quadro 1 – Lista das imagens digitais com suas respectivas datas e resolução espacial.

DATA	TIPO DO SENSOR	Resolução Espacial
17/07/1987	Landsat 5 TM	30m
10/06/1991	Landsat 5 TM	30m
02/07/1999	Landsat 5 TM	30m
11/08/2008	Landsat 5 TM	30m

Fonte: INPE

- Pré-processamento das imagens

Conforme Crosta (1992) as imagens geradas por sensores remotos estão sujeitas a uma série de distorções espaciais (rotação da terra, curvatura da terra, variações de altitude, posição e velocidade da plataforma, dentre outras), não possuindo, portanto, precisão cartográfica quanto ao posicionamento dos objetos, superfícies ou fenômenos representados, sendo necessário aplicar correções (georreferenciamento) que vão reorganizar essas informações em relação a um sistema de projeção cartográfica.

Foi realizado o georreferenciamento e registro dos conjuntos de imagens digitais do Landsat 5 TM, onde os pontos de controle (GCPs) para o georreferenciamento foi feito nas imagens bases Landsat 5 TM, no qual foi escolhido o máximo de pontos, de fácil identificação nestas imagens, para que fosse possível a retificação. As imagens Landsat estavam com o *Datum* SAD69 sendo posteriormente georreferenciadas para o *Datum* WGS 84 UTM 24S.

- Processamento Digital de Imagens – PDI (composições coloridas em RGB 543 e submetidas às mudanças no histograma, por meio de técnicas de PDI como o método de índice (NDWI) é um algoritmo que realce do limite entre áreas emersas e áreas submersas. A elaboração das composições coloridas consistiu na associação de três bandas espectrais, ou da combinação de três razões de bandas, cada uma inserida num canal de cor, dentro do sistema RGB (*Red, Green e Blue*). Este é um produto básico do PDI, porém seu emprego em bandas espectrais possibilita o realce de feições superficiais, que consiste na elaboração de falsas cores, uma vez que emprega bandas com comprimentos de ondas no visível, infravermelho próximo. (ARAÚJO, 2006).
- A análise dos principais componentes (PC's) é apropriada no tratamento de imagens produzidas por sensores remotos com um alto número de bandas espectrais (CROSTA, 1992). É uma técnica que aumenta o conteúdo de informação, isola componentes de ruídos e quando combinadas ao sistema RGB podem favorecer a discriminação de alvos na superfícies terrestres.
- Etapa de campo para verificar a situação da morfologia costeira da área estudada.
- Integração dos dados e confecção dos mapas a partir das interpretações entre duas datas, realizadas segundo os cruzamentos entre linhas de costa para quatro datas distintas (1987, 1991, 1999 e 2008), (Figura 3), com esses dados permitiram observar a evolução da linha de costa em três escalas de tempo – 1987 – 1991; 1991 – 1999; 1999 – 2008. A região

litorânea do município de Acaraú possui cerca de 50 km de extensão e para facilitar a interpretação e análise da evolução da linha de costa, a área foi dividida em litoral oeste e litoral leste, apenas para efeito de interpretação nesta etapa do trabalho

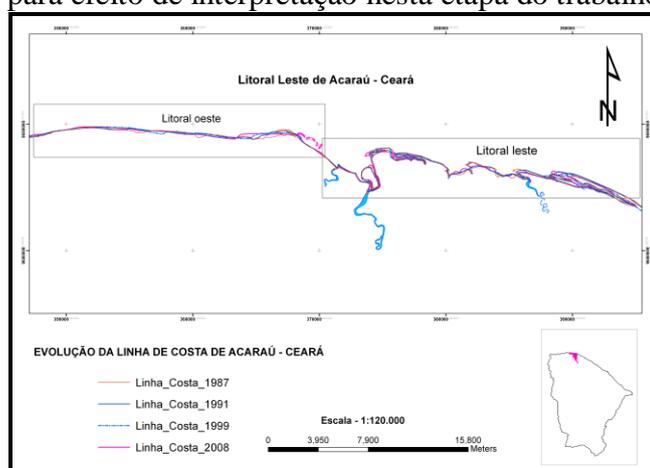


Figura 3 – Evolução da linha de Costa de Acaraú.

O pré-processamento, o processamento digital e a integração das imagens foram feitas no *software* ER Mapper v.6.4 (*Earth Resource Mapping Pty Ltd.*) e a vetorização da linha de costa foram digitalizadas no *software* ArcGIS 9.2. Os cruzamentos das linhas de costa foram feitos para o intervalo de duas datas, caracterizando-as em áreas de erosão, acreção (ou deposição) e sem modificação.

3. Resultados e Discussão

Para a análise multitemporal da evolução da linha de costa de Acaraú foram utilizadas imagens de satélite LANDSAT 5 de 1987, 1991, 1999 e 2008, portanto, uma escala de tempo de 31 anos. A posição da linha de costa sofreu ao longo desses anos muitas variações, desde erosão a acreção de sedimentos, como constatado nas análises temporais, em três principais escalas de tempo, foram elas: 1987-1991; 1991-1999; 1999-2008 (Figura 4).

3.1 Evolução da Linha de Costa do Litoral Oeste de Acaraú

Período 1987 – 1991

Acreção

Nesta escala temporal pôde-se constatar o movimento de transporte de sedimentos com intercalação de áreas de erosão e acreção, essa migração está relacionada às correntes litorâneas no sentido W que acaba gerando o transporte de sedimentos. Na comparação feita entre as linhas de costa para os anos de 1987-1991 (intervalo de 4 anos) calcula-se uma área de aproximadamente de 461,6 m² de erosão ao longo de todo o litoral oeste de Acaraú.

Portanto na área houve predominantemente áreas de deposição ao longo da costa oeste, com uma área de acreção aproximadamente de 1.822,7 m², com destaque para 4 setores com maior aporte de deposição de sedimentos (Figura 4A).

No Setor 1 ocorreu uma menor área de deposição de 94,3 m² numa barra arenosa no extremo oeste da área, feição característica encontrada ao longo do litoral de Acaraú. O setor 4 foi o que ocorreu maior deposição nesse período de análise, ocorrendo uma área de acreção de aproximadamente de 818,2 m². Ao longo dos 31 anos de análise, o setor 4 foi o que mais sofreu intercalações de erosão e deposição de maior escala.

Erosão

Para o processo erosivo no período de 1987-1991, houve significativo recuo de costa para a área estudada, totalizando uma área aproximada de 461,6 m². Para uma melhor visualização a área foi dividida em 4 setores onde ocorreu as maiores taxas de erosão (Figura 4D).

Enquanto que no Setor 2 a área erodida num espaço de 4 anos foi de 129,8 m² para apenas 2km de extensão. O Setor 3 foi a área que apresentou menor taxa de erosão para os 4 setores estudados, de 62,1 m² e o Setor 4 a área de maior volume erodido equivalente a 132,9 m², estando este na região mais afetada pelos processos dinâmicos costeiros de erosão/deposição.

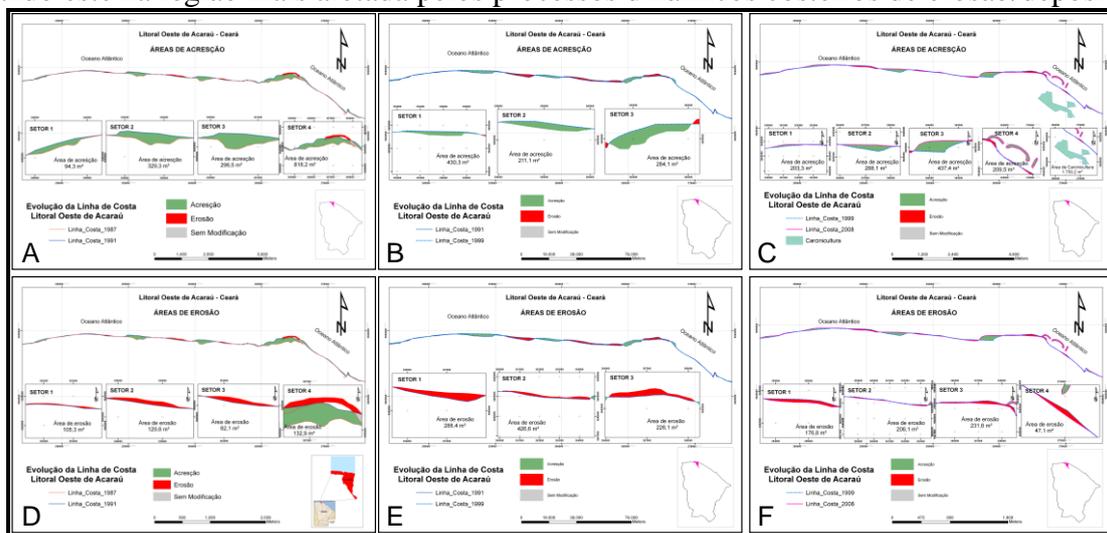


Figura 5 – Evolução da linha de costa da costa oeste de Acaraú.

Período 1991 – 1999

Acresção

No segundo período analisado foi numa escala temporal de 8 anos, onde pode-se observar praticamente os mesmos valores tanto para áreas de erosão como para de deposição.

Na comparação feita entre as linhas de costa para os anos de 1991-1999, as áreas onde houve um maior processo erosivo alcançaram 1.078,9 m² de recuo de costa, enquanto que para as áreas de acresção foram 1.072 m² de sedimentação.

Para as áreas de deposição nesta escala de tempo, foi observado 3 regiões com áreas significativas de acresção, divididos em setores como mostra a (Figura 4B).

Para o primeiro setor, a taxa de deposição no litoral foi de 430,3 m², a maior observada para essa escala de tempo, ocorre numa barra arenosa intercalada por um canal de maré. O setor 3 é uma área de intensa dinâmica litorânea, intercalada ao longo dos anos por processos de erosão e deposição. Para esta área, ao longo de 8 anos houve 284,1 m² de sedimentação.

Erosão

Para o período analisado houve 1.078,9 m² de área erodida ao longo do litoral oeste de Acaraú, cerca de 26 km de extensão. As áreas de erosão mais significativas foram divididos em 3 setores, onde totalizam 941,1 m².

Para o Setor 1 ocorreu 288,4 m² de erosão em cerca de 2,5 km, já para o Setor 2, maior volume de área erodida, de 426,6 m² em 4,5 km. No Setor 3 obteve a menor área dentre os três setores de apenas 226,1 m² (Figura 4E).

Período 1999 – 2008

Acresção

Nesse período de 9 anos (1999-2008) houve significativas alterações ao longo da costa oeste de Acaraú, com regiões alternadas de erosão e sedimentação. Outra alteração na paisagem litorânea dessa região foram as instalações de viveiros de camarão (carcinicultura), localizada próximo a desembocadura do canal de Croa Grande, em áreas de manguezais, possuindo uma área aproximada de 1.759,2 m².

Nessa escala de tempo o processo de deposição (acresção) foi duplamente maior que o processo erosivo em toda costa oeste.

As áreas de acreção sedimentológica ficou dividida em 4 setores para melhor visualizar as regiões de maiores deposições ao longo desses 9 anos. No Setores 1, 2 e 4 ocorreram 203,3 m², 288,1 m² e 209,5 m² (nessa área a sedimentação ocorreu em barras arenosas desligadas do continente) respectivamente. O setor com maior área de sedimentação observou-se no setor 3 alcançando uma área aproximada de 437,4 m² (Figura 4C).

Erosão

A erosão também foi significativa para o período de 1999 a 2008, sendo as maiores áreas erosivas divididas em setores, como mostra a (Figura 4F).

No Setor 1 teve um recuo da linha de costa, com erosão de cerca de 176,8 m², enquanto que no Setor 2 a erosão foi cerca de 206,1 m² ao longo de 5,2 km de costa. No setor 3 a linha de costa recuou 136 m entre as coordenadas geográficas UTM 367000 (N) e 368000 (N), alcançando cerca de 231,6 m², maior área de erosão para esse período. A menor área de erosão está representada no Setor 4, com cerca de 47,1 m² de recuo de linha de costa.

3.2 Evolução da Linha de Costa do Litoral Leste de Acaraú

O litoral leste de Acaraú apresenta uma morfodinâmica bem diferenciada do que foi observada no litoral oeste, é uma área caracterizada por pontais arenosos, ora ligados ao continente em uma das extremidades, ora formam barras arenosas paralelas a costa.

Período 1987 – 1991

Nesta escala temporal pôde-se constatar o movimento de transporte de sedimentos com intercalação de áreas de erosão e acreção, essa migração está relacionada às correntes litorâneas no sentido W que acaba gerando o transporte de sedimentos. Na comparação feita entre as linhas de costa para os anos de 1987-1991 (intervalo de 4 anos) dividida em 4 setores, para melhor acompanhar a variação ocorrida ao longo dos anos.

Na Figura 6A mostra a evolução da linha de costa onde houve sedimentação. Para o Setor 1, pontal arenoso a leste da foz do rio Acaraú, apresentou 225,8 m² de acreção de sedimentos e 176,3 m² de erosão, enquanto que no Setor 2 a área de deposição foi menor com 194,8 m², onde o pontal teve migração de 121 m no sentido W. A taxa de erosão também foi bem menor com relação ao Setor 1, de apenas 74,5 m².

O Setor 4 foi a área que mais sofreu modificações alternadas de erosão e acreção. No entanto, a região erodida não passou de 381 m², enquanto que a deposição de sedimentos foi muito significativa em termos de volume, com cerca de 1.333,6 m² de acreção.

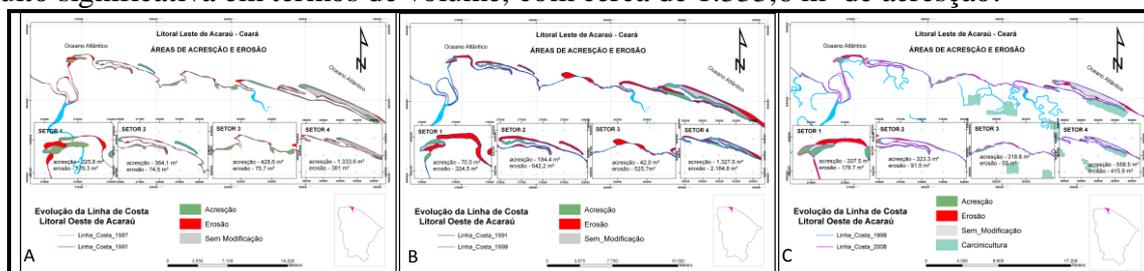


Figura 5 – Evolução da linha de costa leste de Acaraú.

Período 1991 – 1999

Ao longo dos 8 anos ocorreram grandes modificações ao longo de toda a costa leste de Acaraú. Na comparação feita entre as linhas de costa para os anos de 1991-1999 dividida em 4 setores, para melhor acompanhar a variação ocorrida ao longo dos anos.

Os setores que ocorreram modificações significativas foram o 1 e o 4, ambos representados por pontas arenosas, onde predominaram processos erosivos. As taxas de erosão no setor 1 foi de 324,5 m² enquanto que no setor 4 foi de 2.184,8 m².

As áreas de sedimentação ocorreram em resposta aos processos erosivos, sendo bem menos significativas. As maiores taxas de deposição foi nos setores 2 com 184,4 m² e 4 com

1.327,6 m². As mudanças na linha de costa e principalmente nos pontais arenosos mudaram a fisionomia deste ambiente onde atuam os processos dinâmicos costeiros Figura 5B.

Período 1999 – 2008

Neste período analisado, as grandes transformações ocorreram por intervenções antrópicas através da instalação de indústrias de carcinicultura em áreas litorâneas, principalmente em áreas de manguezal, apicum e salgado, como se observa na Figura 5C.

Os processos erosivos e de deposição puderam ser observados ao longo de toda costa leste de Acaraú, ocorrendo à predominância da erosão nos quatro setores analisados nesta escala de tempo.

Neste período de análise, as taxas de deposição foram significativas nos setores 1, 2 e 3 com 207,5 m², 323,3 m² e 318,8 m², respectivamente.

4. Considerações finais

Os produtos de sensores remotos juntamente com os recursos disponíveis no SIG, mostraram extrema eficiência no estudo da análise multitemporal da área estudada, provendo informações procedentes da variação da linha de costa e da dinâmica costeira.

Observou-se que os processos erosivos e de deposição são dinâmicos e inter-relacionados com os condicionantes ambientais locais como (ventos, ondas, correntes e marés), onde dependendo destes condicionantes a área torna-se susceptível a mudanças constantes.

De acordo com a metodologia adotada para a análise multitemporal da área em estudo, possibilitou a geração de imagens cujas interpretações foram fundamentais para o conhecimento da evolução deste ambiente com alta vulnerabilidade a modificações.

Dos períodos analisados, o que ocorreu maiores modificações referentes à erosão e acreção (sedimentação) foi o intervalo dos anos de 1991 a 1999, onde a erosão predominou ao longo da costa e no período de 1999 a 2008 puderam-se observar as mudanças ocorridas devido as intervenções antropogênicas, com a implantação de carcinicultura ao longo de toda a costa, o que ocasionou profundas mudanças sócio-ambientais e grandes impactos.

Referências

- Araújo, A. B. 2006. Análise caracterização da dinâmica da foz do rio Apodi, região de Areia Branca/RN, com base na cartografia multitemporal de produtos de sensores remotos. Dissertação de Mestrado. Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 159p.
- Baptista Neto, J.A. et. al. 2004. Introdução a geologia marinha. Editora Interciência, Rio de Janeiro, 279p.
- Crosta, A.P. 1992. Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto. Editora da Unicamp. Campinas, SP: IG/Unicamp, 170p.
- FREIRE, G. S. S. 1985. Geologia Marinha da Plataforma Continental do Estado do Ceará. Dissertação de Mestrado. Pós-Graduação em Geociências. Departamento de Geologia. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 162p.
- INPE. Site www.inpe.br. Consultado em 19/07/2008.
- INPH (Instituto de Pesquisas Hidroviárias). 2002. Monitoramento Ambiental – Relatório Final de Medições de Ondas. Período de Março/1997 a Outubro/2001. Rio de Janeiro, 60p.
- INPH (Instituto de Pesquisas Hidroviárias). 2001. Monitoramento Ambiental – Relatório de Medições de Vento realizadas na Ponta do Pecém/CE. Período de Setembro/2000 a Janeiro/2001. Rio de Janeiro, 20p.
- PINHEIRO, D.R.de C. (Org.) 2006. Desenvolvimento Sustentável: desafios e discussões. ABC Editora. Rio. São Paulo – Fortaleza, 384p.
- SILVA, A. M. C. 2005. Relações entre a dinâmica costeira e a meio fauna dos sedimentos praias do litoral da Ilha de Itamaracá – PE. Tese de Doutorado. Pós-Graduação em Geociências. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 139p.