



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CENTRO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA E GEOQUÍMICA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**AVALIAÇÃO DE DADOS DE SENSORES REMOTOS NO
RECONHECIMENTO E MONITORAMENTO DE AMBIENTES
COSTEIROS TROPICAIS: CABOS CASSIPORÉ E ORANGE, AMAPÁ**

Dissertação apresentada por:

EDMILSON DAS MERCES BATISTA

**BELÉM
2006**



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

**AVALIAÇÃO DE DADOS DE SENSORES REMOTOS NO
RECONHECIMENTO E MONITORAMENTO DE AMBIENTES
COSTEIROS TROPICAIS: CABOS CASSIPORÉ E ORANGE,
AMAPÁ**

DISSERTAÇÃO APRESENTADA POR

EDMILSON DAS MERCÊS BATISTA

Como requisito parcial à obtenção do Grau de Mestre em
Ciências na Área de GEOLOGIA.

Data de Aprovação: 18/09/2006

Comitê de Dissertação:

Co-orientador: ODETE FÁTIMA MACHADO DA SILVEIRA



PEDRO WALFIR MARTINS E SOUZA FILHO (Orientador)



ALBERTO GARCIA FIGUEIREDO JR.



MARIA THEREZA RIBEIRO DA COSTA PROST

Belém

Aos meus pais, Ana e Lucas, pelo carinho, amor e apoio dedicado em toda essa vida, e à minha esposa, Sara, pelo amor, compreensão e companheirismo em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

Esta dissertação não seria possível sem o apoio e a participação de diversas instituições e pessoas. Expresso nestas curtas linhas, minha gratidão por todo o apoio depositado.

À Universidade Federal do Pará-UFGPA, que através do Programa de Pós Graduação em Geologia e Geoquímica-PPGG da UFGPA, ofereceu a oportunidade e infra-estrutura para realização do curso de mestrado.

Aos colegas do Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá-IEPA, pelo apoio dado nos trabalhos de campo.

Ao Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Renováveis-IBAMA pela concessão da licença de pesquisa para o PARNA Cabo Orange e apoio nos levantamentos de campo.

À Superintendência Regional do INCRA no Amapá, na pessoa de sua Superintendente, Sra. Maria Cristina do Rosário Almeida, que sempre apoiou e priorizou a qualificação deste servidor no âmbito da instituição.

Ao Prof^o Dr. Pedro Walfir Martins e Souza Filho, pela forma responsável e dedicada com que trata suas orientações, pela amizade, pelos "puxões de orelha" nos momentos de distância e pelas lições, que com certeza não irei esquecer, as quais sempre buscaram o aprimoramento deste trabalho.

À Prof Dra. Odete Fátima Machado da Silveira, pela co-orientação e confiança depositada desde a elaboração da proposta de mestrado até as críticas e incontáveis revisões feitas neste manuscrito.

Aos Drs. Mário Ivan Cardoso e Cláudio Fabian Szlafsztein (UFGPA), pela avaliação preliminar deste trabalho durante o ciclo de seminários, pelas valiosas sugestões e palavras de incentivo.

Ao biólogo Salustiano Vilar da Costa Neto (IEPA), pela revisão do conteúdo relacionado com a vegetação do PARNA Cabo Orange.

Aos geólogos Márcio Sousa (Negão) e Marcos Henrique (Marcão) pelo apoio nos trabalhos de campo e discussões a respeito da geologia costeira da região dos Cabos Cassiporé e Orange.

Aos amigos do Laboratório de Análise de Imagens do Trópico Úmido (LAIT), Msc. Fabrício Gonçalves, Msc. Sheila Teixeira e Messiana Beatriz, pela imensa ajuda no processamento das imagens orbitais.

Aos demais colegas do LAIT, Glenda Carvalho, Msc. Francisco Ribeiro, Luís Fernando Souza, Afonso Quaresma, Carlos Bessa, pela receptividade, incontáveis favores e gentilezas prestadas.

Aos grandes amigos que fiz na UFPa, Msc. Ismail Bastos, geólogo Charles Carvalho, engenheiro civil Felipe (Nelito). Embora os conheça há tão pouco tempo, nossa amizade parece ser de longas datas.

A todas as pessoas que tive a oportunidade de conhecer durante o curso de mestrado, as quais tornaram possível a conclusão desta dissertação.

Por fim, gostaria de fazer um agradecimento especial a Deus, pela família abençoada que me proporcionou: meus pais e sete irmãos, os quais tenho, cada um, dentro do coração, e pela minha esposa Sara, com quem tenho compartilhado as maiores realizações de minha vida.

"Grande coisa é haver recebido do céu uma partícula da sabedoria, o dom de achar as relações das coisas, a faculdade de as comparar e o talento de concluir."

Machado de Assis

SUMÁRIO

	Pág.
DEDICATÓRIA	iv
AGRADECIMENTOS	v
EPÍGRAFE	vii
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	xi
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xvi
RESUMO	1
ABSTRACT	2
1. INTRODUÇÃO	3
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO DA ZONA COSTEIRA AMAZÔNICA	3
1.2. OBJETIVOS	6
1.2.1. Geral	6
1.2.2. Específicos	6
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	6
2. ÁREA DE ESTUDO	8
2.1. UNIDADES MORFOLÓGICAS	11
2.2. REDE HIDROGRÁFICA	12
2.3. PARÂMETROS HIDRODINÂMICOS, OCEANOGRÁFICOS E METEREOLÓGICOS	13
2.3.1. Marés e ondas	14
2.3.2. Ventos	16
2.4. CONDIÇÕES CLIMÁTICAS	16
2.5. COBERTURA VEGETAL	17
3. SENSORIAMENTO REMOTO E SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
3.1. SENSORIAMENTO REMOTO	19
3.1.1. Sensoriamento Remoto em estudos costeiros	20
3.2. SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS (SIG's)	21
3.2.1. Sistemas de Informações Geográficas em estudos costeiros	22
4. SISTEMAS SENSORES UTILIZADOS NESTA PESQUISA	24
4.1. SENSORIAMENTO REMOTO ÓPTICO	24
4.1.1. O Programa Landsat	24
4.1.1.1. Características dos Produtos Landsat utilizados	26
4.2. SENSORIAMENTO REMOTO NAS MICROONDAS: SISTEMAS IMAGEADORES POR RADAR	26
4.2.1. Características operacionais dos sistemas de RADAR	28
4.2.1.1. Comprimento de onda	28
4.2.1.2. Polarização	29
4.2.1.3. Direção ou azimute visada	29
4.2.1.4. Ângulo de incidência	30
4.2.1.5. Resolução espacial	31
4.2.2. Propriedades da superfície	31
4.2.2.1. Constante dielétrica e teor de umidade	31

4.2.2.2. Rugosidade da superfície	32
4.2.3. O Programa JERS-1	32
4.2.3.1. Características das imagens JERS-1 utilizadas	34
4.2.4. O Programa RADARSAT	35
4.2.4.1. Características da imagem SAR/RADARSAT utilizada.....	38
4.2.5. A Missão SRTM	38
4.2.5.1. Características dos Produtos SRTM utilizados	39

5. RECONHECIMENTO E MAPEAMENTO DE AMBIENTES COSTEIROS EM CABOS LAMOSOS (CASSIPORÉ E ORANGE-AP), A PARTIR DE DADOS DE SENSORES REMOTOS E SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS (SIG)..... 40

RESUMO	40
5.1. INTRODUÇÃO.....	40
5.2. ÁREA DE ESTUDO	42
5.3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	44
5.3.1. Dados de sensores remotos utilizados	44
5.3.2. Processamento digital das imagens de sensores remotos	45
5.3.2.1. Processamento da imagem Landsat ETM 7	45
5.3.2.2. Processamento da imagem RADARSAT Wide-1	46
5.3.2.3. Processamento da imagem JERS-1	47
5.3.2.4. Processamento dos dados SRTM.....	47
5.3.3. Levantamento de campo	47
5.3.4. Mapeamento das formas e ambientes costeiros	48
5.4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
5.4.1. Reconhecimento das unidades morfológicas e ambientes costeiros	49
5.4.1.1. Planalto costeiro.....	50
5.4.1.2. Planície costeira	52
5.4.1.2.1. Planície lamosa de supramaré.....	52
5.4.1.2.2. Planície lamosa de intermaré	57
5.4.1.3. Planície aluvial	63
5.4.1.3.1. Pântanos de água doce.....	63
5.4.1.3.2. Lagos	67
5.4.1.3.3. Canal fluvial	69
5.4.1.3.4. Planície de inundação fluvial	70
5.4.2. Mapeamento dos ambientes costeiros	71
5.5. CONCLUSÕES.....	73

6. MUDANÇAS MORFOLÓGICAS NA LINHA DE COSTA AO LONGO DOS CABOS CASSIPORÉ ORANGE ATRAVÉS DA ANÁLISE MULTI-TEMPORAL DE IMAGENS DE SENSORES REMOTOS

RESUMO.....	75
6.1. INTRODUÇÃO.....	75
6.2. ÁREA DE ESTUDO.....	78
6.3. MATERIAIS, TÉCNICAS E PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	80

6.3.1. Correção geométrica dos dados de sensores remotos.....	81
6.3.2. Avaliação do cálculo de erros a partir dos pontos de controle	82
6.3.3. Realce das imagens.....	83
6.3.4. Análise dos dados em sistemas de informações geográficas	83
6.3.4.1. Delimitação e evolução dos manguezais costeiros	83
6.3.5. Trabalhos de campo	84
6.4. RESULTADOS	84
6.4.1. Modificações da linha de costa	84
6.4.1.1. Cabo Orange – Setor 1	85
6.4.1.2. Foz do Rio Cassiporé – Setor 2	90
6.4.1.3. Cabo Cassiporé – Setor 3	91
6.4.2. Quantificação e evolução do manguezal no período.....	93
6.5. DISCUSSÕES	95
6.6. CONCLUSÕES.....	97
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	99
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURAS

CAPÍTULO 1:

Figura 1.1- Localização da Área de Estudo, mostrando a distribuição das unidades morfoestruturais Planalto e Planície Costeira (modificado de Allison et al., 1995a)..... 04

CAPÍTULO 2:

Figura 2.1 – Planícies costeiras holocênicas influenciadas por lamas amazônicas ao longo da costa nordeste da América do Sul, desde a desembocadura do rio Amazonas até o rio Orenoco. Adaptado de Allison *et al.* (1995a)08

Figura 2.2– Variação espacial e temporal em períodos de acumulação e erosão costeira evidenciados em quatro áreas da linha de costa amapaense (Fonte: Nittrouer *et al.* 1996)10

Figura 2.3 – Tipos de linha de costa encontrados na porção norte do Estado do Amapá (Fonte: Allison *et al.* 1995a) 11

Figura 2.4 –Comportamento da Corrente Costeira Norte Brasileira-CCNB, dos ventos alíseos e da descarga do rio Amazonas (adaptado de Nittrouer *et al.*, 1991; Silveira, 1998) 13

Figura 2.5 –Amplitude das marés durante no período equinocial do ano de 2004 para o Porto de Caiena (Guiana Francesa). Fonte DHN (2004)14

Figura 2.6 – Locais de maior ocorrência do fenômeno da pororoca no litoral amapaense (Adaptado de Santos *et al.*, 2004) 15

Figura 2.7 – Precipitação acumulada no ano de 2004 para área de estudo. Fonte: CPTEC (2006) 17

CAPÍTULO 3:

Figura 3.1- Fluxo da REM no processo de aquisição de dados de sensoriamento remoto (adaptado de Lusch, 1999) 19

CAPÍTULO 4:

Figura 4.1 - Geometria de imageamento de um sistema SAR. Fonte: Raney (1998)..... 30

Figura 4.2 - Esquema demonstrado o efeito da reflexão de canto (*double bounce*), onde A) o pulso de microondas interage com o caule da vegetação e a superfície e; B) interação da energia com alvos urbanos (edificações). Adaptado de Lewis et al. (1998) 34

Figura 4.3 - Modos de imageamento do Sistema Radarsat-1. Fonte: RADARSAT-1 Internacional (1995) 36

CAPÍTULO 5:

Figura 5.1 - Localização da Área de Estudo, mostrando distribuição das unidades morfoestruturais Planalto e Planície Costeira (modificado de Allison et al., 1995a) 43

Figura 5.2 - Visão geral da área de estudo a partir do modelo digital de elevação SRTM. A-B representa a localização do perfil topográfico constante da Figura 5.8	50
Figura 5.3 – Padrões de resposta espectral do Planalto Costeiro: A – imagem Landsat ETM (composição 5R4G3B); B – imagem JERS-1; imagem RADARSAT-1; D – fotografia tomada em sobrevôo	51
Figura 5.4 - Campos alagáveis de supramaré recobertos por vegetação do tipo gramíneas (interior do Cabo Orange). Ao fundo, observa-se o contato com o manguezal costeiro (Foto realizada em período chuvoso)	53
Figura 5.5 - imagem Landsat ETM 7 (composição 5R4G1B). Observar as Unidades Morfológicas: Planalto (a), Planície Costeira (b,c,d), Planície Aluvial (e,f,g,h,i). As feições e ambientes discriminados são: (b) planície lamosa de supramaré (campos alagáveis); (c) planície lamosa de intermaré (planície de lama); (d) manguezais de intermaré; (e) pântanos de água doce (<i>fresh water marsh</i>); (f) <i>fresh water Swamp</i> ; (g) barra fluvial; (h) planície de inundação fluvial e (i) lagos.....	54
Figura 5.6 - Imagem RADARSAT-1. Observar as unidades morfológicas: Planalto (a), Planície Costeira (b,c,d), Planície Aluvial (e,f,g,h,i). As feições e ambientes discriminados são: (b) planície lamosa de supramaré (campos alagáveis); (c) planície lamosa de intermaré (planície de lama); (d) manguezais de intermaré; (e) pântanos de água doce (<i>fresh water marsh</i>); (f) <i>fresh water Swamp</i> ; (g) barra fluvial; (h) planície de inundação fluvial e (i) lagos.....	55
Figura 5.7 - Imagem JERS-1. Observar as unidades morfológicas: Planalto (a), Planície Costeira (b,c,d), Planície Aluvial (e,f,g,h,i). As feições e ambientes discriminados são: (b) planície lamosa de supramaré (campos alagáveis); (c) planície lamosa de intermaré (planície de lama); (d) manguezais de intermaré; (e) pântanos de água doce (<i>fresh water marsh</i>); (f) <i>fresh water Swamp</i> ; (g) barra fluvial; (h) planície de inundação fluvial e (i) lagos.....	56
Figura 5.8 - Perfil topográfico da planície costeira (cabo Orange), no trecho em que ocorre o contato entre os manguezais de intermaré e os campos alagáveis de supramaré a partir do modelo digital de elevação SRTM. Observar a localização do perfil na Figura 5.2.....	57
Figura 5.9 - Segunda componente (CP2) obtida a partir da análise de componentes principais das bandas ETM (2000): 1,2,3,4,5 e 7. Observar as unidades morfológicas: Planalto (a), Planície Costeira (b,c,d), Planície Aluvial (e,f,g). As feições e ambientes discriminados são: (b) planície lamosa de supramaré (campos alagáveis); (c) planície lamosa de intermaré (planície de lama); (d) manguezais de intermaré; (e) pântanos de água doce (<i>fresh water marsh</i>); (f) <i>fresh water Swamp</i> ; (g) barra fluvial.....	58
Figura 5.10 - Contato entre os manguezais costeiros e a <i>tidal mudflat</i> não vegetada na linha de costa do cabo Orange (foto obtida em condição de baixa-mar)	60
Figura 5.11 - Manguezal em erosão no costa do cabo Cassiporé (Ponta do Marrecal).....	61
Figura 5.12 - Previsão de amplitude das marés para o dia 08/01/2003. Fonte: DHN (2004)	62
Figura 5.13 - Precipitação no ano de 2004 para área de estudo. Fonte: CPTEC (2006).....	62

Figura 5.14- Evolução da planície costeira no trecho que compreende o cabo Cassiporé (fonte: imagem interferométrica SRTM). N-S representa a localização do perfil topográfico constante da Figura 5.15.....	65
Figura 5.15- Perfil topográfico da planície costeira (cabo Cassiporé), no trecho em que ocorre o contato entre a vegetação de várzea (Fresh water swamp) e os campos inundáveis ou campos de várzea (Fresh water marsh) a partir do modelo digital de elevação SRTM. Observar a localização do perfil na Figura 5.16.....	66
Figura 5.16 – Pântanos de água doce recobertos por vegetação do tipo arbustiva (freshwater swamp) observados no interior do cabo Cassiporé. Fonte gentilmente cedida pela Dra. Odete Fátima M. Silveira.....	67
Figura 5.17- Em primeiro plano o Lago Maruani e ao fundo os pântanos de água doce.....	68
Figura 5.18 - barra lamosa fluvial recoberta por vegetação de várzea as margens do rio Cassiporé.....	69
Figura 5.19 -reconhecimento da planície de inundação fluvial a partir do mecanismo de <i>double bounce</i> na imagem JERS-1 (imagem tomada no período chuvoso)	71
Figura 5.20 - Mapa das unidades geomorfológicas, feições e ambientes costeiros dos cabos Orange e Cassiporé, produzido a partir das imagens de sensores remotos e de observações de campo.....	72

CAPÍTULO 6:

Figura 6.1– Localização da área de estudo, mostrando distribuição dos ambientes e feições costeiras do local. Na linha de costa, os números representam a setorização da área visando o monitoramento de sua evolução.....	78
Figura 6.2– Fluxograma da metodologia adotada nesta pesquisa.....	81
Figura 6.3– Áreas de erosão e acreção ao longo da linha de costa dos cabos Cassiporé e Orange. Junto ao litoral, os números representam a setorização da área conforme o processo dominante (erosão ou acreção).....	85
Figura 6.4– Taxas de acumulação/erosão quantificadas na área de estudo.....	86
Figura 6.5– Evolução da linha de costa ao longo do cabo Orange: A) imagem JERS-1 obtida em 1996 superposta por um vetor da linha de costa em 2003. B) imagem Radarsat-1 obtida em 2003 superposta por um vetor da linha de costa em 1980. Observar as feições e ambientes morfológicos: m.j = mangue jovem; m.a. = mangue adulto, b.l. = bancos lamosos.....	87
Figura 6.6– Processo e feição morfológica decorrente da acreção costeira no cabo Orange: crescimento do cabo lamoso com sucessão de vegetação pioneira e jovem de mangue estabelecida.....	88
Figura 6.7– Mapa do sistema de dispersão amazônico atuante na costa nordeste da América do Sul. Fonte: Allison & Lee (2004)	89
Figura 6.8– Planície de maré lamosa acrecionária desenvolvida junto ao cabo Orange. Observar ao fundo a presença de manguezais (foto obtida em condição de baixa-mar)	90
Figura 6.9– Linha de costa em erosão ao longo do cabo Cassiporé.....	91

Figura 6.10 – Modificação da linha de costa ao longo do Cabo Cassiporé: A) imagem Landsat MSS-2 obtida em 1980 superposta por um vetor da linha de costa em 1992. B) imagem Landsat TM-4 obtida em 1992 superposta por um vetor da linha de costa em 2000. C) imagem Landsat ETM-7 obtida 2000 superposta por um vetor da linha de costa em 2003.....	92
Figura 6.11 – Manguezal erodido ao longo da planície lamosa de intermaré desenvolvida no cabo Cassiporé, na Ponta do Marrecal.....	93
Figura 6.12 – Distribuição de manguezais (polígonos em verde) ao longo do Parque Nacional do Cabo Orange	94

TABELAS

CAPÍTULO 2:

Tabela 2.1 -Características das bacias hidrográficas dos rios Cassiporé e Uaçá. Fonte: Allison et al. (1995a)	12
--	----

CAPÍTULO 4:

Tabela 4.1 - Principais características do Subsistema MSS/Landsat. Fonte: Novo (1992).....	24
Tabela 4.2 -Características espectrais dos sensores TM/ETM+ do Landsat 4, 5 e 7. Fonte: Moreira (2003).....	25
Tabela 4.3 - Características das imagens Landsat utilizadas nesta pesquisa.....	26
Tabela 4.4 - Comprimento de onda de RADAR e frequências usadas em pesquisas de sensoriamento remoto de Microondas ativas (Fonte: Jensen, 2000)	28
Tabela 4.5 – Características e especificações técnicas do Sistema JERS-1. Fonte: GRFM (1998)	32
Tabela 4.6 - Características das imagens JERS-1 utilizadas.....	34
Tabela 4.7 - Características e especificações técnicas do Sistema RADARSAT-1. Fonte: Radarsat-1 Internacional (1995)	35
Tabela 4.8 - Características dos modos de operação do RADARSAT-1. Fonte: RADARSAT-1 Internacional (1995)	37
Tabela 4.9 - Características dos produtos SRTM utilizados.....	39

CAPÍTULO 5:

Tabela 5.1 -Características dos dados de sensoriamento remoto utilizados.....	44
Tabela 5.2 - Cinco mais altos valores dos índices OIF calculados para as 6 bandas espectrais do sensor ETM/Landsat.....	45
Tabela 5.3 - Variância (%) das 6 componentes principais do sensor ETM/Landsat.....	46
Tabela 5.4 - Unidades Morfológicas, sub-unidades e ambientes costeiros mapeados na área investigada.....	49

CAPÍTULO 6:

Tabela 6.1- Características dos dados de sensoriamento remoto utilizados.....80

Tabela 6.2- Margem do erro geométrico de cada imagem e cumulativo para o período analisado..... 82

Tabela 6.3- Modificações ocorridas na linha de costa: acreção (+) e erosão (-) costeira no período de 1980-2003..... 87

Tabela 6.4- Área de manguezal no Parque Nacional do Cabo Orange de acordo com o levantamento realizado por Herz (1991) e aquelas obtidas no presente estudo (período de 1974-2003) 95

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	-Agência Nacional de Águas
ASF	-Alaska SAR em Fairbanks
ASI	-Agenzia Spaziale Italiana (Agência Espacial Italiana)
CPRM	-Serviço Geológico do Brasil
CPTEC	-Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
CSA	-Canadian Space Agency
DEM	-Digital Elevation Model
DHN	-Departamento Nacional de Hidrografia e Navegação
DLR	-Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt (Agência Espacial Alemã)
EORC	-Earth Observation Research Center
ERST-1	-Earth Resources Technology Satellite – 1
ESA	-European Space Agency
ETM+	-Enhanced Thematic Mapper Plus.
GCP	-Ground Control points
GEMS	-Goodyear Mapping System
GRFM	-Global Rain Forest Mapping
IBAMA	-Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Renováveis
IEPA	-Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá
IFOV	-Instantaneous Field of View
INPA	-Instituto Nacional e Pesquisas da Amazônia
INPE	-Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
JERS-1	-Japanese Earth Satellite-1 (JERS-1)
JPL	-Jet Propulsion Laboratory
JRC/SAI	-Space Applications Institute of the Joint Research Centre of the European Commission
MSS	-Multiespectral Scanner Subsystem
NASA	-National Aeronautics and Space Administration
NASDA	-National Space Development Agency of Japan
OIF	-Optimum Index factor
PIXEL	-Picture x Element

RADAM	-Radar da Amazônia
RADAR	-Radio Detection and Ranging
RADARSAT-1	-Radar Satellite – 1
RAR	-Real Aperture Radar
RMS	-Root Mean Square
SAR	-Synthetic Aperture Radar
SIG	-Sistema de Informação Geográfica
SLAR	-Side Looking Airborne Radar
SRTM	-Shuttle Radar Topography Mission
TM	-Thematic Mapper

RESUMO

Diferentes produtos provenientes de sensores remotos orbitais ópticos (Landsat MSS, TM, ETM) e nas microondas (Radarsat-1, JERS-1 e Missão SRTM), assim como ferramentas e técnicas de Sistemas de Informações Geográficas-SIG's foram avaliados no estudo de ambientes costeiros tropicais desenvolvidos na região dos cabos lamosos Orange e Cassiporé, norte do Brasil.

A área estudada está inserida no contexto do sistema de dispersão Amazônico, apresentando morfologia costeira controlada pelo enorme fluxo de água doce e sedimentos depositados pelo rio Amazonas a partir de sua foz no extremo sul do Estado do Amapá.

Na abordagem metodológica voltada para o mapeamento geomorfológico, os resultados obtidos permitiram a compartimentação da área de estudo em três domínios geomorfológicos: planalto, planície costeira (planície lamosa de intermaré e supramaré) e planície aluvial (pântanos de água doce, lagos, depósito de barras e planície de inundação fluvial).

Considerando a necessidade de se quantificar as mudanças ocorridas na linha de costa em médio período, uma análise multi-temporal foi realizada. Para tanto, valeu-se do uso de cinco imagens digitais de sensores remotos: Landsat MSS-2 (1980), Landsat TM-4 (1992), JERS-1 (1996), Landsat ETM-7 (2000), e RADARSAT-1 (2003). A comparação foi feita *pixel a pixel*, sendo que o geoindicador dos limites da linha de costa foi fixado tomando-se como referência a vegetação costeira. O mapeamento, quantificação e análise espacial das mudanças costeiras foram realizados com o emprego de Sistemas de Informações Geográficas-SIG. Os resultados desta análise permitiram a setorização da área de estudo, de acordo com o processo dominante (erosão ou acumulação).

Neste sentido, o emprego de dados orbitais, devidamente processados, tornou possível mensurar, de modo geral, qualitativa e quantitativamente, diferentes posições de formas progradacionais (acumulação) e retrogradacionais (erosão), possibilitando o conhecimento e disposição da morfologia costeira, ao expor informações ligadas à direção, intensidade e abrangência dos fenômenos.

Do mesmo modo, o mapeamento geomorfológico obtido em escala de detalhe (1:100.000) a partir de informações produzidas por diferentes sensores remotos e em diferentes faixas do espectro eletromagnético, mostra o potencial desta tecnologia para o conhecimento e monitoramento de ambientes tropicais costeiros amazônicos.

ABSTRACT

Different products proceeding from orbital remote sensing optical (Landsat MSS, TM, ETM) and in the microwaves (Radarsat-1, JERS-1 and Mission SRTM), as well as tools and techniques of geographic information system had been evaluated in the developed tropical coastal environment study in the region of the Mudcapes Orange and Cassiporé, north of Brazil.

Studied area is inserted in the context of the Amazonian System of Dispersion, presenting controlled coastal morphology for the enormous water flow candy and sediments poured for the River Amazon in its estuary in the south extremity of the State of the Amapá.

In the metodological boarding directed toward the geomorphologic mapping, the gotten results had allowed the compartmentation of the study area in three geomorphological landforms: plateaus, coastal plain (mud plain of intertidal and supratidal) and aluvial plain (fresh water marsh-swamp, lakes, deposit of bars and plain of fluvial flooding).

Considering the necessity of quantifying the ocured changes in the shoreline in average period, an analysis multitemporal was carried through. For in such a way, it was used the use of five digital images of remote sensors: Landsat MSS-2 (1980), Landsat TM-4 (1992), JERS-1 (1996), Landsat ETM-7 (2000), and RADARSAT-1 (2003). The comparison was basead pixel pixel, being that the geoindicador of the limits of the shoreline was fixed being overcome as reference the coastal vegetation. The mapping, quantification and space analysis of the coastal changes had been carried through with the of geographic information system-SIG. The results of this analysis had allowed the sectorization of the study area, in accordance with the dominant process (erosion or accumulation).

In this direction, the job of orbital data, duly processing, became possible to mensurar, in general way, qualitatively and quantitatively, different positions of progradation forms (accumulation) and retrogradation (erosion), making possible the knowledge and disposal of the coastal morphology, when displaying on information to the direction, intensity and abrangência of the phenomena.

In a similar way, the gotten geomorphologic mapping in scale of detail (1: 100.000) from information produced for different remote sensors and in different bands of the electromagnetic spectral, it shows to the potential of this technology for the knowledge and monitoring of Amazonian coastal tropical environments.

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO DA ZONA COSTEIRA AMAZÔNICA

Situada em ambiente amazônico, o maior e mais bem preservado ecossistema tropical do mundo, a costa amazônica brasileira representa cerca de 18% de todo o litoral nacional, concentrando a segunda maior extensão de áreas colonizadas por manguezais do planeta (Spalding *et al.*, 1997), observado nos Estados do Amapá, Pará e Maranhão (FUNBIO, 2002).

Nesta região, a planície costeira caracteriza-se por apresentar uma extensa faixa de terras baixas holocênicas, freqüentemente inundáveis, bordejadas por um tabuleiro pouco elevado (de 6 a 15 m de altitude, aproximadamente), constituído por sedimentos neógenos, susceptíveis a elevadas temperaturas e precipitações pluviométricas, bem como pela ação de processos fluviais e marinhos.

No caso da planície costeira do Estado do Amapá, objeto de estudo desta pesquisa, pode-se conceber que esta região apresenta características ímpares em relação a sua posição geográfica por encontrar-se adjacente à foz do Rio Amazonas, considerada a maior em descarga líquida, com $5,7 \times 10^{12} \text{m}^3/\text{ano}$ (Oltman, 1968), e a segunda em descarga sólida do planeta, com $2-3 \times 10^8 \text{ ton/ano}$ sedimentos dissolvidos (Gibbs, 1970) e $1,1-1,3 \times 10^9 \text{ ton/ano}$ de sedimentos em suspensão (Meade *et al.*, 1985).

Embora ao longo das últimas décadas diversos trabalhos de pesquisa tenham focado o conhecimento geológico-geomorfológico da zona costeira amapaense (Mendes, 1994, Allison *et al.*, 1995a, 1995b, Nittrouer & Kuehl, 1995, Nittrouer *et al.*, 1995, Nittrouer *et al.*, 1996, Silveira, 1998, Santos *et al.*, 2004), lacunas no mapeamento sistemático de detalhe e semi-detalhe incentivaram a realização desta pesquisa na Região compreendida entre os cabos Cassiporé e Orange (**Figura 1.1**)

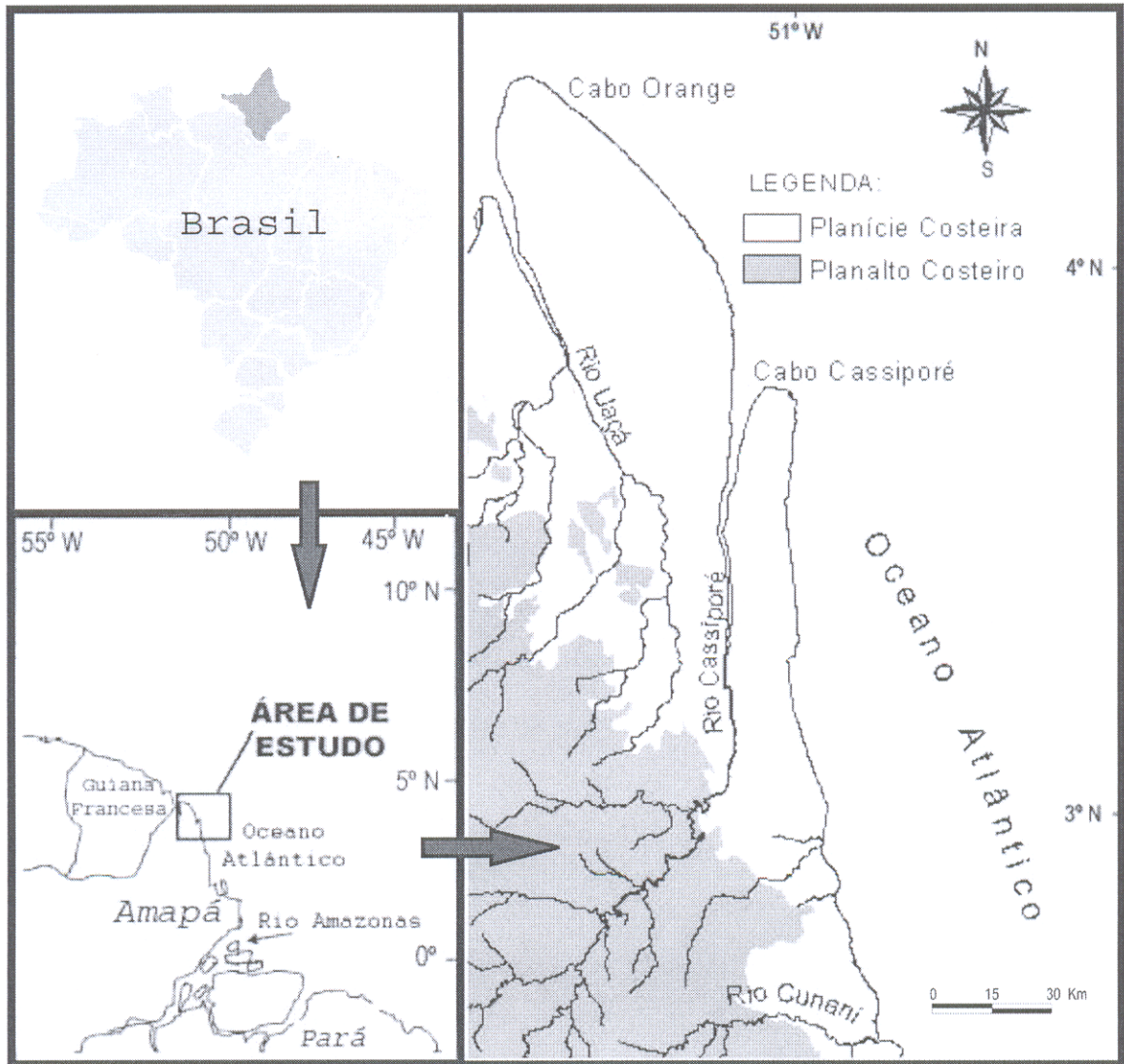


Figura 1.1 – Localização da Área de Estudo, mostrando distribuição das unidades morfoestruturais Planalto e Planície Costeira (modificado de Allison *et al.*, 1995a).

A escolha da área de estudo deve-se a sua importância ecológica e baixa ocorrência de processos antrópicos, considerando que no local localiza-se o Parque Nacional do Cabo Orange (Brasil, 1980). Há de se considerar também, a variabilidade de ambientes sedimentares costeiros e de fenômenos geomorfológicos atuantes na linha de costa do local e, principalmente, a ausência de trabalhos de mapeamento em escala semi-detalhada demonstrando tais variáveis.

Considerando estas características, o sensoriamento remoto desponta como uma importante ferramenta para elucidação da problemática proposta, isto porque, esta tecnologia pode registrar em diferentes faixas espectrais, escalas e épocas do ano, aspectos relacionados com a composição físico-química de ambientes inseridos em regiões litorâneas.

Sensores remotos adquirem informações sobre um objeto de interesse pela detecção e mensuração das mudanças que o mesmo impõe ao campo eletromagnético ao seu redor. Sensores que operam no visível e no infravermelho próximo, onde a luz solar refletida é usada para adquirir informação sobre determinado objeto, como é o caso das imagens Landsat, Spot, CBERS, etc. têm servido de base para levantamentos geomorfológicos realizados em todo o mundo (Gowda *et al.* 1995, Ciavola *et al.* 1999; Yang *et al.*, 1999, Souza Filho, 2000, Froidefonde *et al.*, 2004; Fromard *et al.*, 2004).

No entanto, em regiões amazônicas a constante cobertura de nuvens, bruma, chuva ou fumaça decorrente de queimadas, torna limitável a eficácia da utilização de dados ópticos, fazendo com que geocientistas passassem a incorporar em suas análises dados de sensoriamento remoto nas microondas, ou seja, os Radares de Abertura Sintética-SAR (Prost, 1997; Souza Filho & Paradella, 2003; Souza Filho *et al.*, 2005a; Gonçalves, 2005, Teixeira, 2006).

Esta tecnologia além de superar tais barreiras, pois opera independentemente do Sol e possui capacidade de imageamento com condições climáticas adversas (Lewis *et al.*, 1998), agrega informações ligadas com as propriedades geométricas (macro, micro-topografia ou rugosidade superficial) do alvo, delimitando estruturas geológicas com grande habilidade (Paradella *et al.*, 2000).

No caso da costa amapaense, que apresenta elevada dinâmica de transformações em sua linha de costa através da erosão e progradação costeira, a existência de imagens de sensores remotos (radares e ópticas) de diferentes épocas, converte a análise multi-temporal em uma excelente ferramenta para auxiliar estudos geomorfológicos e sedimentológicos costeiros de detalhe, ao estender informações pontuais de uma área para um contexto geográfico, possibilitando o entendimento da história evolutiva destes sistemas deposicionais (Novo, 1992; Liu *et al.*, 2002; Trebossen *et al.*, 2005, Chu *et al.*, 2006), além de identificar áreas sujeitas ao desflorestamento e regeneração das florestas de manguezal (Souza Filho *et al.*, 2005b).

Dentro deste contexto, a presente pesquisa faz uma avaliação dos atuais produtos oriundos de sensores remotos ópticos e nas microondas, tais como imagens Landsat TM/ETM, RADARSAT-1, JERS-1 e dados de elevação SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*), assim como de ferramentas e técnicas de Sistemas de Informações Geográficas, para mapeamento e

monitoramento geomorfológico em uma região tropical úmida dominada por lama localizada no extremo norte do Brasil.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Geral

O objetivo principal desta pesquisa é a utilização e avaliação de tecnologia espacial, a partir do uso de imagens de sensores remotos ópticos (Landsat MSS/TM/ETM) e de microondas (RADARSAT-1 Width, JERS-1, SRTM), técnicas de processamento digital de imagens para o estudo geológico e geomorfológico de um setor da zona costeira amapaense.

1.2.2. Específicos

De maneira, específica, esta pesquisa visa:

- Caracterizar o cenário geológico regional da costa amapaense, no setor compreendido entre os cabos Orange e Cassiporé, através da utilização de imagens de sensores remotos ópticos e de microondas;
- Buscar uma melhor compreensão dos processos dinâmicos que envolvem os mecanismos erosivos e deposicionais na região de estudo.
- Avaliar as técnicas de processamento de imagens adequadas para o mapeamento e monitoramento geológico de ambientes costeiros amazônicos.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O trabalho foi estruturado em capítulos, de acordo com a seguinte seqüência:

No Capítulo 2, é feita uma breve caracterização da área de estudo. Descreve os aspectos naturais, relacionados com a geologia, geomorfologia, vegetação, clima, parâmetros hidrodinâmicos, oceanográficos e meteorológicos.

No Capítulo 3, é feita uma sucinta revisão bibliográfica da aplicação de dados de sensores remotos e sistemas de informações geográficas em estudos costeiros.

No Capítulo 4, são abordados os sistemas sensores utilizados nesta pesquisa (Landsat, Radarsat-1, Jers-1 e SRTM).

Nos capítulos 5 e 6, são apresentados, na forma de minuta de artigo científico, os resultados obtidos. O reconhecimento e mapeamento dos ambientes fazem parte do capítulo 5 e a análise multi-temporal das modificações costeiras ocorridas durante as últimas duas décadas são apresentadas no capítulo 6.

Por fim, no capítulo 7, são feitas as considerações finais.

CAPÍTULO 2

2- ÁREA DE ESTUDO

O Estado do Amapá está localizado no extremo norte do país. É limitado a Sul pelo Estado do Pará, à Leste pela foz do Amazonas, a Norte/Nordeste pelo Oceano Atlântico e a Oeste pela Guiana Francesa (**Figura 1.1**).

A área estudada encontra-se inserida na zona costeira norte amapaense, possuindo uma extensão de aproximadamente 100 Km, a qual é representada pelos cabos Orange e Cassiporé. O primeiro localiza-se entre os rios Cassiporé e Uaçá, e o segundo entre o rio Cassiporé e o Oceano Atlântico (**Figura 1.1**).

Os cabos Cassiporé e Orange (Brasil) e Ponta *Behague* (Guiana Francesa) marcam o início da zona de passagem de bancos lamosos no contexto do sistema de dispersão de lamias amazônicas, o qual é formado ao longo de 1.600 Km da costa nordeste da América do Sul, no trecho que compreende a foz do rio Amazonas e o rio Orenoco (Allison & Lee, 2004). A partir desta região, as feições fisiográficas são dominadas pela presença de planícies de maré com bancos lamosos holocênicos que migram em direção a NW (Fromard *et al.*, 2004; **Figura 2.1**).

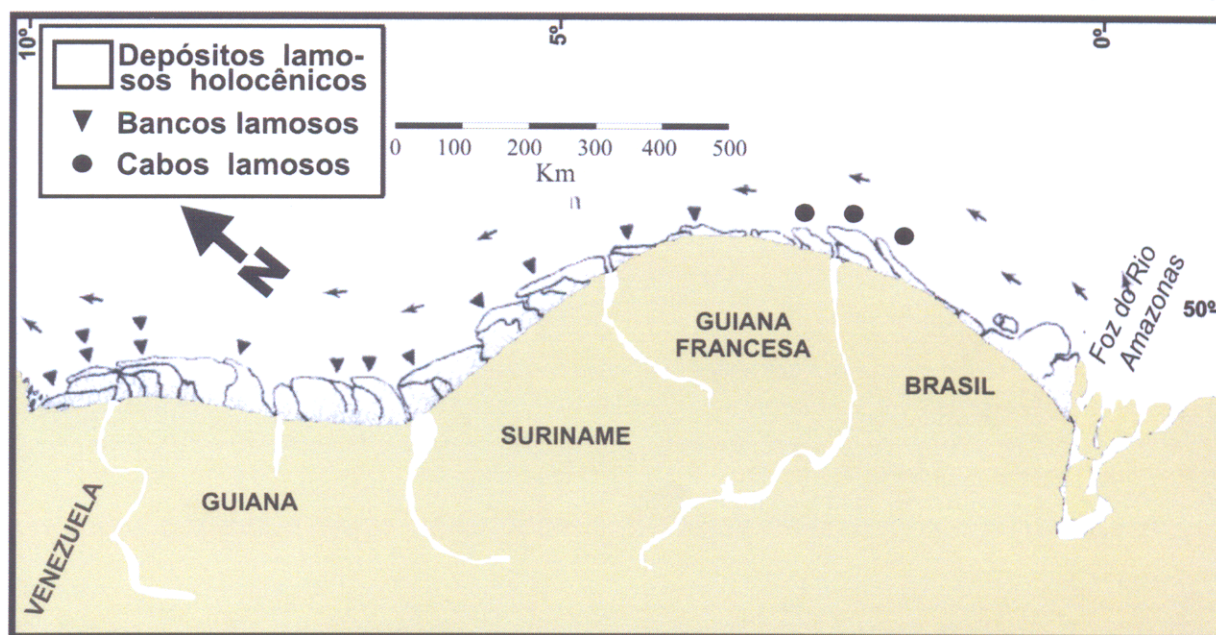


Figura 2.1 – Planícies costeiras holocênicas influenciadas por lamias amazônicas ao longo da costa nordeste da América do Sul, desde a desembocadura do rio Amazonas até o rio Orenoco. Adaptado de Allison *et al.* (1995a).

Os cabos lamosos foram formados em estuários, a partir de estratos lamosos oriundos do Rio Amazonas, depositadas em taxas de acumulação, quase sempre superiores a 2cm/ano

(Allison *et al.*, 1995a). Estas feições são, geralmente, colonizadas em sua borda por manguezais, estando sujeitas a movimentos acrecionários ou erosivos, devido a movimentação de bancos lamosos de inframaré e ação dos agentes hidrodinâmicos das marés, ondas e correntes (Warne *et al.*, 2002). Os manguezais fornecem um mecanismo adicional de retenção e fixação de sedimentos, atuando como "armadilhas" para o sedimento e também servindo como proteção à remoção pelo ataque das ondas (Allison *et al.*, 2000).

A costa amapaense está inserida no sistema de dispersão amazônico, sendo afetada diretamente pela elevada descarga hídrica e sedimentar do rio Amazonas. O Amazonas aporta ao Oceano Atlântico a maior vazão de água doce do planeta, despejando 16% de toda a água doce descarregada nos oceanos (Oltman, 1968), estando também entre os três maiores rios do mundo em descarga de sedimentos em suspensão (Livingstone, 1963; Meade *et al.*, 1979; Milliman & Meade, 1983), liberando aproximadamente $1,2 \times 10^9$ toneladas de sedimentos por ano em sua plataforma (Meade *et al.*, 1985).

Grande parte dos sedimentos amazônicos, quando influenciados por correntes de maré, são transportados e depositados por cerca de 1.600 Km de extensão, formando na costa do Amapá, Guiana Francesa e Suriname o mais longo e contínuo depósito de lama moderna do mundo (Allison & Lee, 2004).

As lamas adjacentes ao Amazonas são compostas, principalmente, por silte, em uma proporção que alcança até 9 vezes o teor de argila, contribuindo com cerca de 95 % do material em suspensão, com diâmetro médio de 4 μm (Gibbs, 1977). Em contraste, os sedimentos que recobrem a plataforma a nordeste do Amazonas são ricos em argila, com a razão argila/argila+silte geralmente maior que 0,6 (Gibbs, 1977).

Gibbs (1973) a partir de análises granulométricas realizadas com amostras de fundo coletadas durante os anos 1963 e 1971 sobre a plataforma norte da América do Sul (desde a desembocadura do rio Amazonas até a Venezuela), concluiu que, a maioria das amostras de sedimentos da parte interna da plataforma brasileira caracterizaram-se por porcentagens maiores ao 60% de materiais finos ($< 2 \mu$). Em contrapartida, na plataforma externa, o sedimento fino constituiu menos de 10 % e o material grosso ($> 20 \mu$), o que representa mais de 80%.

Os depósitos de lama oriundos do Amazonas, ao longo de 350 Km da costa do Amapá, são de idade entre 500 e 1.300 anos (Allison *et al.*, 1995b). Os estratos holocênicos foram depositados a partir do sedimento em suspensão do Amazonas, em planícies de marés e

manguezais, sendo registrados, no mínimo, dois ciclos de progradação-retrogradação da linha de costa nos últimos 3.000 anos (Allison, 1993). Esta informação é corroborada por Nittrouer *et al.* (1996), que ao examinar quatro trechos da linha de costa amapaense, evidenciou diferentes episódios de sedimentação e erosão dentro da referida escala do tempo (**Figura 2.2**).

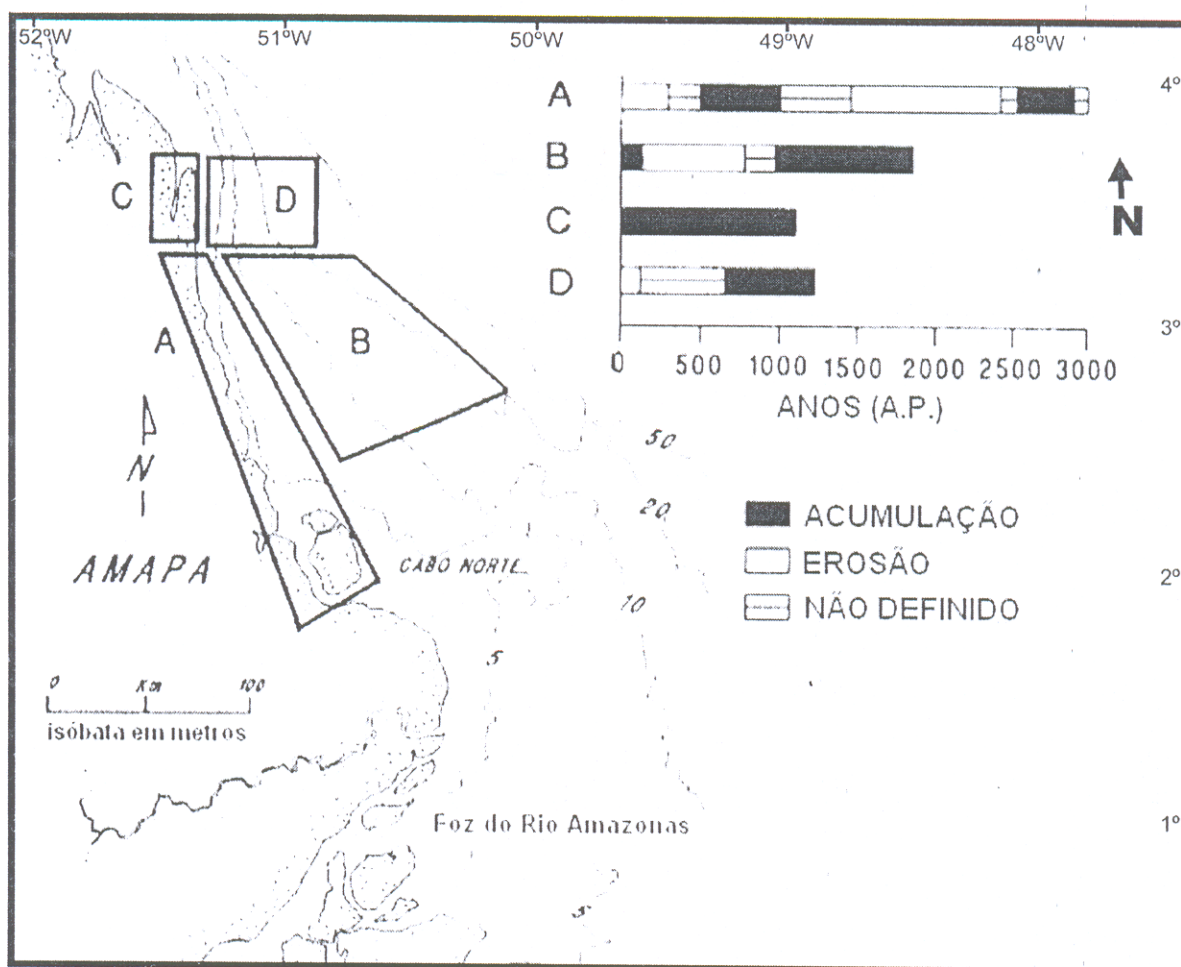


Figura 2.2– Variação espacial e temporal em períodos de acumulação e erosão costeira evidenciados em quatro áreas da linha de costa amapaense. (Fonte: Nittrouer *et al.*, 1996).

Nittrouer & Kuehl (1995), por sua vez, reconheceram uma zona de acumulação na área objeto deste estudo, que, nos últimos 1.000 anos foi submetida a uma rápida acreção de sedimentos lamosos, e um litoral, compreendido entre o Cabo Cassiporé e o Cabo Norte, que vem sofrendo um processo de erosão nos últimos 500 anos.

Os processos de erosão e acumulação interagem com diferentes tipos de substratos costeiros (lama e areia) ao longo de toda a planície costeira da área de estudo, gerando, segundo Allison *et al.* (1995a), três distintos tipos de padrões de costa no Estado do Amapá:

costa formada por areia acrecionária, lama acrecionária e lama erosiva, esta última, subdividida de acordo com a morfologia em terraços, denteada e reta (**Figura 2.3**).

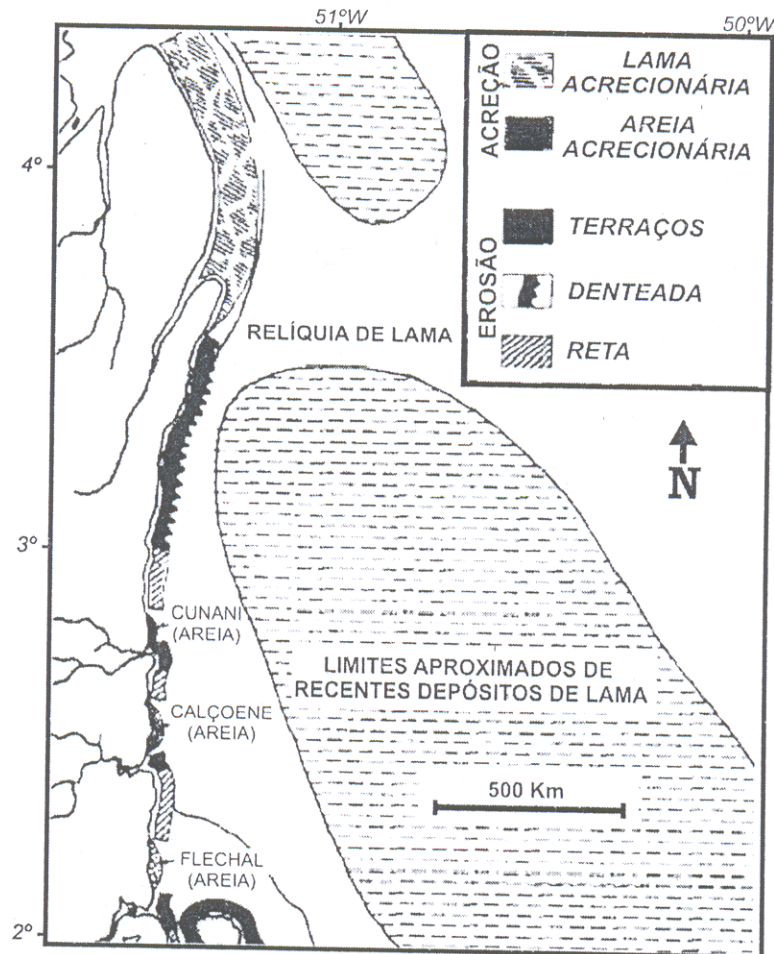


Figura 2.3– Tipos de linha de costa encontrados na porção norte do Estado do Amapá (Fonte: Allison *et al.* 1995a).

2.1. UNIDADES MORFOLÓGICAS

Ao longo do litoral norte amapaense ocorre uma expressiva deposição de sedimentos trazidos pelo Rio Amazonas. A região costeira da área de estudo é formada por uma extensa planície de idade holocênica, produto dos depósitos sedimentares predominantemente finos (areia, silte e argila).

O relevo regional é constituído pelas unidades morfológicas: planalto e planície costeira (**Figura 1.1**). O Planalto costeiro está esculpido nas litologias do Núcleo Arqueano Oiapoque, o qual é representado por granodioritos, trondhjemitos, tonalitos e tipos gnaissificados de idêntica

composição (Lima *et al.*, 1991; Avelar, 2002). As cotas altimétricas atingem até 100 metros, sendo produto da dissecação do Complexo Guianense (escudo Pré-Cambriano das Guianas). O Neógeno é representado pelo Grupo Barreiras por uma extensa superfície de pediplanação (Silveira, 1998), constituída por sedimentação arenosa, areno-argilosa, argilo-siltosa e conglomerática, em sistemas de leques aluviais e lacustres (Lima *et al.*, 1991).

A planície costeira é constituída por sedimentos holocênicos areno-argilosos, arenosos, argilo-siltosos e conglomeráticos em sistema de leque aluviais, planícies fluviais, flúvio-marinhas, marinhas e lacustres (Lima *et al.*, 1991; Silveira, 1998). O relevo é plano, pouco acidentado e baixo (< 5 m), com largura variável de 15 a 100 Km (Silveira, 1998; Allison *et al.*, 1995a; Mendes, 1994), sendo influenciado por condições de marés e ondas, assim como, marcada pela forte atuação de processos erosivos-depositacionais em toda linha de costa (Kuehl *et al.*, 1996).

2.2. REDE HIDROGRÁFICA

Na área de estudo a rede de drenagem apresenta grande densidade, sendo formada por cursos de caráter permanente, lagos e drenagens interrompidas. Os rios são de porte mediano, têm seus cursos meandantes à retilíneos e deságuam no Oceano Atlântico.

Destacam-se na área os rios Cassiporé e Uaçá, os quais nascem no Escudo das Guianas, formam meandros e fluem em direção NE no trecho que atravessa a extensa superfície pediplanada que recobre litologias pré-cambrianas e sedimentos fanerozóicos do planalto guianense, entrando em contato com sedimentos quaternários da planície costeira, onde seus cursos são alterados bruscamente para o sentido Norte, tornando seu traçado retilíneo e paralelo à linha de costa regional (Mendes, 1994).

Ambos possuem uma bacia hidrográfica que atinge cerca de 10.000 Km², contribuindo com ~ 1.3x10⁵ ton/ano de sedimentos lançados no Oceano Atlântico (**Tabela 2.1**).

Tabela 2.1 – Características das bacias hidrográficas dos rios Cassiporé e Uaçá.

Rio	Bacia de Drenagem (Km ²)	Descarga d'água (10 ⁹ m ³ /ano)	Descarga de sedimentos (10 ⁵ ton/ano)
Cassiporé	5.796	3.8	1.2
Uaçá	4.354	2.8	0.87

Fonte: Allison *et al.* (1995a)

2.3. PARÂMETROS HIDRODINÂMICOS, OCEANOGRÁFICOS E METEOROLÓGICOS

Toda faixa costeira amapaense ocupa posição equatorial (0° - 4° N), sendo caracterizada como um ambiente extremamente dinâmico, devido a conjunção de fatores que interagem e produzem características oceanográficas únicas (Baptista Neto *et al.*, 2004), em especial, pela ação dos ventos alíseos de nordeste, ciclo de marés, ondas, Corrente Costeira Norte Brasileira (CCNB) e pela Zona de Convergência Inter-tropical (ZCI) (**Figura 2.4**).

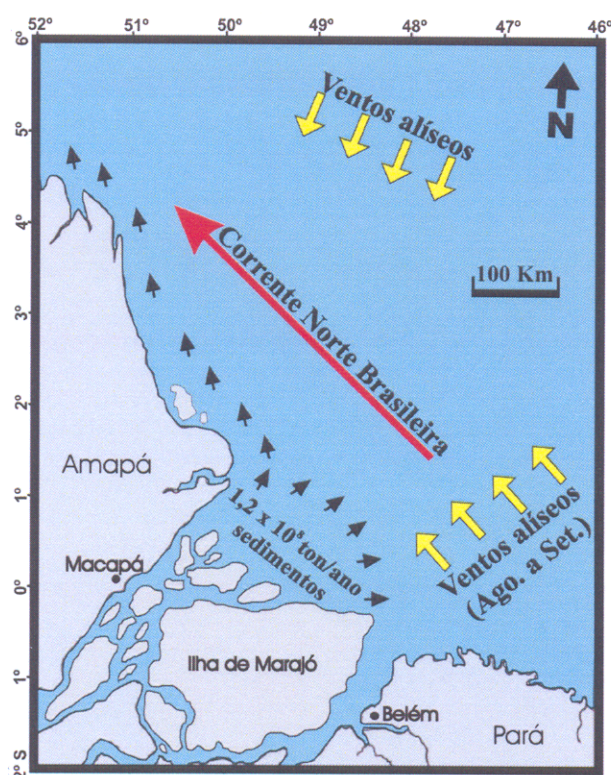


Figura 2.4 –Comportamento da Corrente Costeira Norte Brasileira-CCNB, dos ventos alíseos e da descarga do rio Amazonas (adaptado de Nittrouer *et al.*, 1991; Silveira, 1998)

A Corrente Costeira Norte Brasileira (CCNB) é a principal corrente de contorno oeste do Atlântico equatorial fluindo no sentido noroeste sobre o talude continental e a parte externa da plataforma ao longo da costa brasileira.

Em relação aos padrões oceanográficos, no litoral amapaense ocorrem dois tipos sazonais de circulação oceânica: **a)** entre os meses de dezembro e maio, quando há movimentação para sul da Zona de Convergência Intertropical, ocorre um tipo de circulação oceânica, onde as correntes fluem para NW, com velocidades de até 0,76 m/s, podendo atingir

1,5 - 2m/s na foz do rio Amazonas (Nittrouer & Demaster, 1986) e Ilha de Maracá, respectivamente; **b)** a partir de junho, a CCNB diminui de intensidade e transporta uma menor quantidade de material argiloso em direção às Guianas.

2.3.1. Marés e ondas

As marés no Amapá são semidiurnas, apresentando regime macrotidal (de 5 a 8 metros) na região próxima a Ilha do Maracá, decrescendo em direção aos Cabos Cassiporé e Orange, quando passam a ter amplitudes variando de 2 a 3m (DHN, 2005) (**Figura 2.5**).

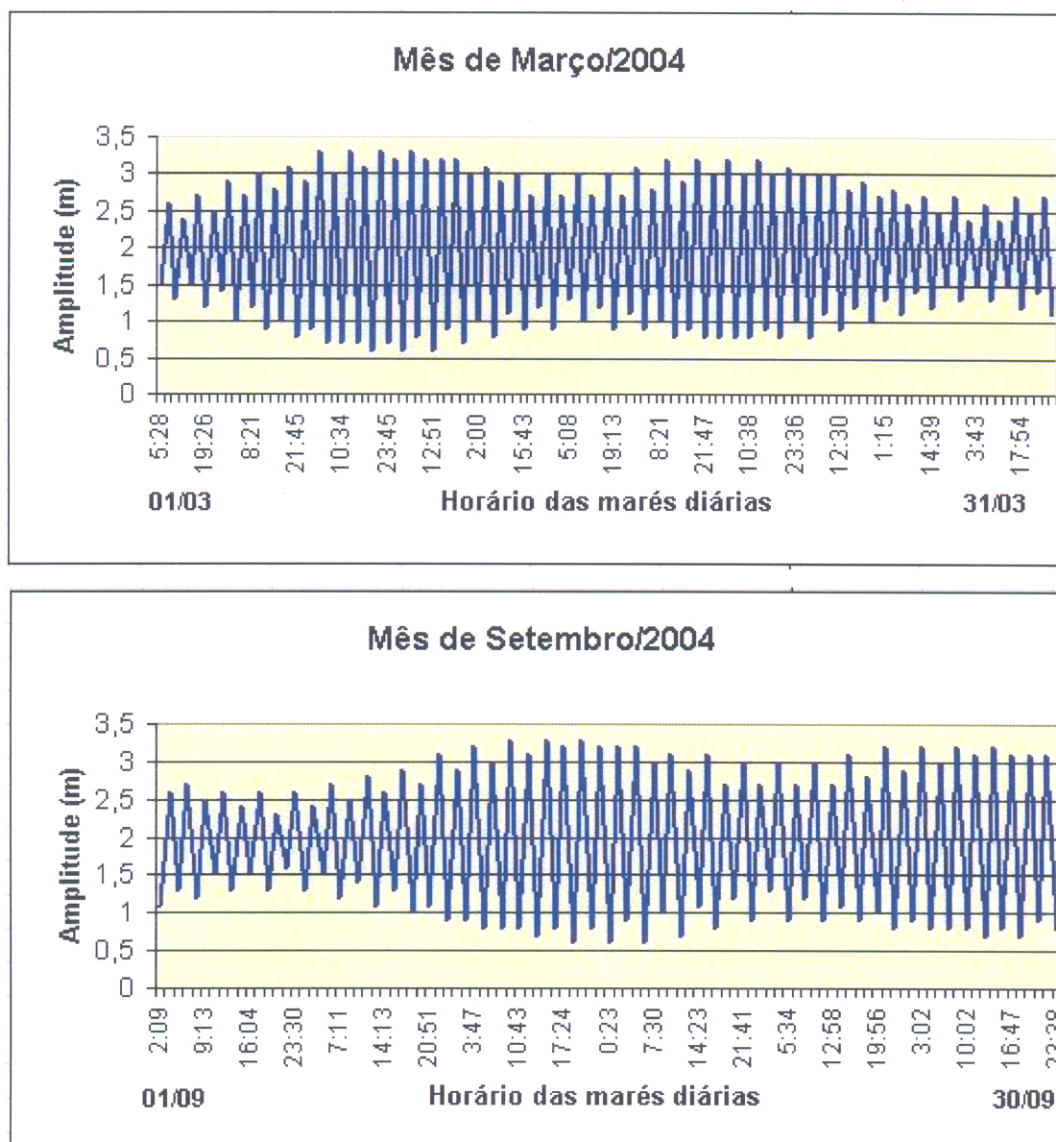


Figura 2.5 –Amplitude das marés durante o período equinocial do ano de 2004 para o Porto do Caiena (Guiana Francesa). Fonte: DHN (2005)

As correntes de maré são da ordem de 1 m/s e dirigidas no sentido perpendicular às isóbatas locais (Beardsley *et al.*, 1995). Durante as marés de sizígias e quadraturas são observadas importantes variações nos seus níveis e velocidades. As máximas correntes de maré ocorrem durante as sizígias (~ 2 m/s) e as mínimas nas quadraturas ($\sim 0,7$ m/s) (Geyer & Kineke, 1995).

Tais condições tornam a navegação no litoral amapaense fortemente dependente das fases de marés (preamar e baixa-mar), além de ocasionarem em alguns trechos a ocorrência do fenômeno da pororoca (**Figura 2.6**).



Figura 2.6 – Locais de maior ocorrência do fenômeno da pororoca no litoral amapaense (Adaptado de Santos *et al.*, 2004).

As ondas que atingem a faixa litorânea apresentam período dominante de 6-7 segundos e altura média de 1,5 metros (Mendes, 1994). As maiores ocorrem durante os meses de fevereiro à abril, quando os ventos alíseos estão mais fortes (Meserve, 1974). Elas se propagam do quadrante E, tomando direcionamento para W em direção a linha de costa (Allison *et al.*, 2000).

2.3.2. Ventos

Os ventos são importantes agentes modeladores das planícies costeiras, pois atuam diretamente na propagação das ondas que atingem a linha de costa, provocando intensa movimentação das águas, bem como transportando sedimentos da plataforma interna em direção à costa (Nittrouer *et al.*, 1996).

Nas regiões de baixa latitude, onde a área de estudo está inserida, os ventos alíseos sopram de nordeste para sudoeste (no hemisfério norte) e de sudoeste para nordeste (no hemisfério sul), atingindo velocidade média de 5 a 10m/s, com picos máximos no período de dezembro a março, quando ambos se complementam (Geyer *et al.*, 1991). Os alíseos caracterizam-se por ter variação sazonal associada à migração da Zona de Convergência Inter-Tropical (ZCIT) da atmosfera.

A Zona de Convergência Inter-tropical é a região onde os ventos alíseos dos dois hemisférios convergem, sendo esta geralmente associada à elevada temperatura da água do mar, grande umidade na atmosfera, presença de nuvens e alta precipitação (Baptista Neto *et al.*, 2004).

Segundo Fontes (2000), quando a ZCIT está localizada próxima ao equador, geralmente, de março a abril, a plataforma está submetida à ação dos ventos alísios de nordeste. Por sua vez, durante os meses de agosto e setembro, a ZCIT migra para o norte ($\sim 5^\circ$ N), ficando a região sob a influência dos alísios de sudeste (Fontes, 2000).

2.4. CONDIÇÕES CLIMÁTICAS

A área de estudo apresenta clima tropical ($0^\circ - 4^\circ$ N) úmido e superúmido, com médias térmicas anuais oscilando entre 26° e 28°C (Bezerra *et al.*, 1990) e precipitações pluviométricas superiores a 3.000 mm ao ano (ANA, 2004), sendo que nos meses de janeiro, abril e maio

chove quase 50% do total em relação ao ano. O déficit hídrico apresenta taxas em torno de 189mm, sendo que as menores cotas ocorrem nos meses de setembro e outubro, quando chove pouco, de 35 e 30mm, respectivamente (**Figura 2.7**).

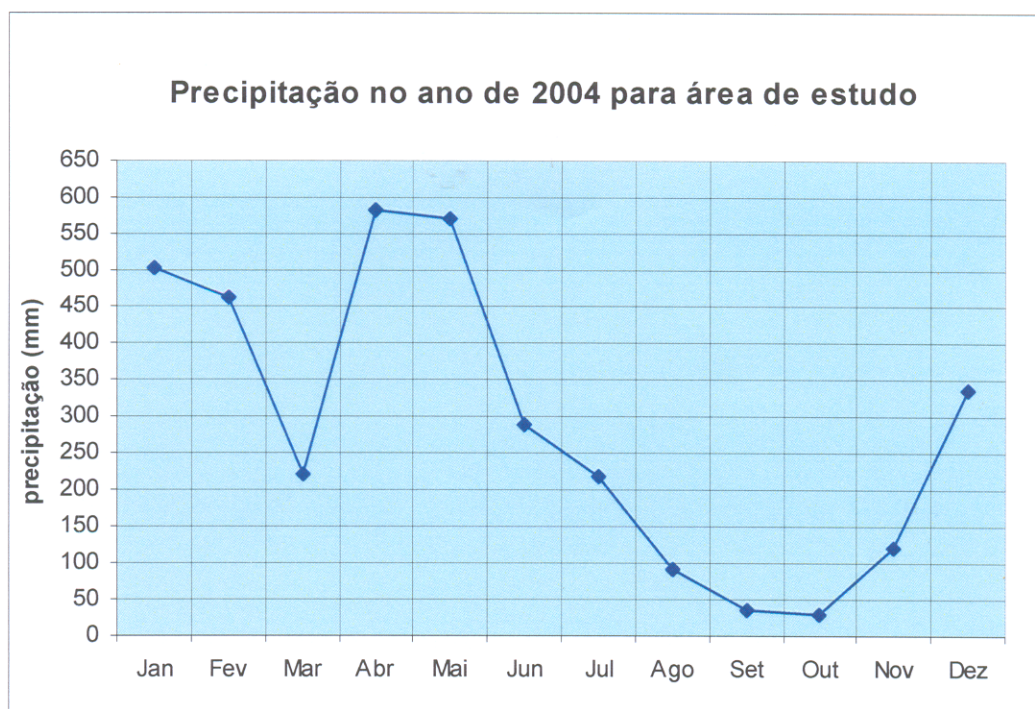


Figura 2.7 –Precipitação acumulada no ano de 2004 para área de estudo. Fonte: CPTEC (2006).

O regime pluviométrico está diretamente relacionado com as duas estações existentes na região: uma bastante chuvosa, que vai desde janeiro até o mês de julho, seguida de uma estação subseca, mais espaçada, que começa em agosto e se prolonga até dezembro.

2.5. COBERTURA VEGETAL:

A região dos cabos Orange, Cassiporé e entorno apresentam cobertura vegetal bem preservada. A maior parte da área de estudo compõe a Unidade de Conservação Parque Nacional do Cabo Orange, ocupando cerca de 619.000 Km² (Brasil, 1980).

O planalto costeiro é recoberto por floresta ombrófila densa de terra-firme, de grande porte, tipicamente encontrada em toda região amazônica (IEPA/IBAMA, 2003).

Na planície, especialmente nos cabos Orange e Cassiporé, os campos arbustivos e herbáceos predominam. As espécies das famílias *Poacea*, *Cyperaceae*, *Alismataceae*, entre outras, caracterizam este ambiente (IEPA/IBAMA, 2003). Ao longo das margens dos rios Cassiporé e Orange, onde o ciclo de enchente e vazante de água doce atua, ocorre o desenvolvimento da vegetação de várzea.

Em ambiente flúvio-marinho e ao longo de toda linha de costa, a ação de fatores hidrodinâmicos (marés, correntes e ondas) concomitantemente com a salinidade e temperatura da água favorecem a progradação costeira e a deposição de sedimentos nas margens dos meandros de rios, ocasionando a colonização de extensas áreas por mangue. Dentre as espécies, destacam-se a siriúba (*Avicenia germinans*), mangue-vermelho (*Rhizophora mangle*) e mangue-amarelo ou branco (*Laguncularia sp*) (Herz, 1991; Schaeffer-Novelli *et al.*, 2000).

Nas porções onde aparecem os canais de maré com sedimentos menos consolidados, o gênero *Rhizophora mangle* é dominante, enquanto nas áreas de sedimento compactado, predomina a espécie *Avicenia germinans* (IEPA/IBAMA, 2003).

CAPÍTULO 3

3. SENSORIAMENTO REMOTO E SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são abordados os fundamentos teóricos do sensoriamento remoto e dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG's).

3.1. SENSORIAMENTO REMOTO

Sensoriamento remoto é a tecnologia ou técnica pela qual são obtidos dados da superfície terrestre através do uso do fluxo de radiação da energia eletromagnética (REM) refletida ou emitida pelos alvos existentes na superfície terrestre, sem necessidade de contato físico com este (Novo 1992; Florenzano 2002). Para tanto, é necessário um conjunto de sistemas computacionais responsáveis pela detecção, aquisição e processamento dos dados (sensor, plataforma, computadores, software, etc.).

A energia eletromagnética utilizada na coleta dos dados por sensoriamento remoto é também denominada de radiação eletromagnética. Parte do fluxo de energia emitida pelo sol, atravessa as diferentes camadas atmosféricas e interage com a superfície terrestre (**Figura 3.1**).

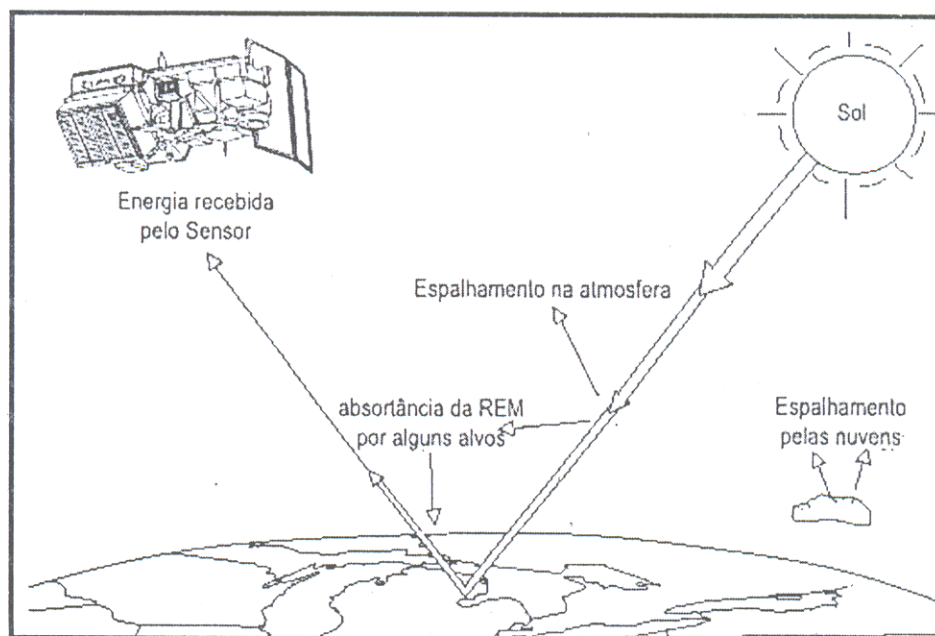


Figura 3.1- Fluxo da REM no processo de aquisição de dados de sensoriamento remoto (modificado de Lusch, 1999).

O princípio básico envolvido nos métodos de sensoriamento remoto é que, em diferentes faixas de comprimentos de ondas ou frequências, cada tipo de objeto reflete ou emite certa intensidade de radiação, que é dependente de seus atributos físicos ou da sua composição química. Assim, utilizando essa informação de uma ou mais faixas de comprimentos de ondas, há possibilidade de se diferenciar objetos, podendo esta informação ser utilizada para realização de inventários, mapeamentos e estudos de conhecimento e monitoramento de recursos naturais.

O sensoriamento remoto representa, portanto, uma ferramenta de grande importância para a aquisição de informações sobre regiões extensas, com complexa variabilidade sazonal e de difícil acesso como é caso da Amazônia brasileira.

3.1.1. Sensoriamento remoto em estudos costeiros

Nas últimas décadas, graças aos avanços tecnológicos, a ferramenta do sensoriamento remoto tem se tornado indispensável em estudos voltados para aplicações costeiras. É fato que com a crescente disponibilidade de satélites comerciais operando em diferentes faixas espectrais, com diferentes resoluções, o uso de imagens orbitais de sensores ópticos (Landsat TM/ETM, SPOT, CBERS-2, MODIS, etc) e de microondas (RADARSAT-1, JERS-1, SRTM, entre outros) têm sido uma alternativa viável para o conhecimento e monitoramento dos processos físico-químicos que ocorrem em extensas áreas oceânicas e costeiras (Bentz *et al.*, 2005).

Em zonas costeiras a utilização de dados de sensores remotos orbitais, em função de sua rapidez, precisão e periodicidade de obtenção, permite que se produzam mapas, em escala variada, para os mais variados fins, especialmente, para o mapeamento sistemático de detalhe (Gonçalves, 2005).

No monitoramento de processos costeiros, a análise multi-temporal obtida através do uso de imagens adquiridas em diferentes épocas, tem ajudado a entender a história evolutiva dos litorais, bem como, proporcionado mensurar com precisão os processos relacionados com a erosão e acreção costeira (França & Souza Filho, 2003; Froindefonde *et al.*, 2004; Allison & Lee, 2004; Fromard *et al.*, 2004; Trebossen *et al.*, 2005; Souza Filho *et al.*, 2005b).

No caso da região costeira tropical amazônica, que em virtude de sua grande extensão e dificuldade de acesso, as ferramentas do sensoriamento remoto têm e podem contribuir ainda mais com o esclarecimento de lacunas do conhecimento.

3.2. SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS (SIG's)

Sistemas de Informações Geográficas (SIG's) constituem-se num banco de dados capaz de armazenar e manipular dados geograficamente georreferenciados (Silva, 2003). Um SIG é também um conjunto poderoso de ferramentas para coletar, armazenar, recuperar, transformar e visualizar dados sobre o mundo real para um propósito particular (Burrough, 1986). Existe uma diversidade de definições de SIG, estas refletem a multiplicidade de usos possíveis destes sistemas de softwares e hardware, que são constituídos por módulos de análises espaciais.

Geralmente, um sistema de informações geográficas contém vários módulos operacionais que auxiliam o usuário na investigação e produção de informações georreferenciadas.

Os componentes básicos de um SIG são: interface com o usuário, entrada e integração de dados, consulta e manipulação, saída de dados e sistema de gerenciamento de banco de dados. Cada sistema de informação geográfica, em função de seus objetivos e necessidades, implementa estes componentes de forma distinta, mas todos estão presentes em um SIG (Câmara, 1994).

Existem vários SIG's disponíveis em soluções comerciais (softwares) como o ArcMap e MapInfo, e outros de domínio público, como por exemplo, o SPRING, desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). No entanto, todos possuem de um modo ou de outro os componentes básicos apontados anteriormente.

Os dados espaciais extraídos do universo do mundo real e incluídos em modelos de dados em SIG são derivados de dados disponíveis em cadastros públicos, dados censitários, infra-estrutura urbana, dados eleitorais, econômicos, uso e ocupação do solo, hidrologia, entre outros. Para representar estes dados do mundo real, os sistemas de informações geográficas possuem dois formatos básicos de representação de dados: **formato raster** e **formato vetorial** (Câmara, 1994).

Na representação raster, as características de uma determinada área geográfica são definidas, como um conjunto de células de uma grade regular. Todas as células da grade regular possuem a mesma forma e o mesmo tamanho e cada uma é identificada por uma coordenada geográfica de localização. As características são representadas por uma célula ou por um grupo de células de determinada porção com a mesma identificação. Esta representação é indicada, principalmente para trabalhar com formas contínuas de características semelhantes

como, por exemplo: tipo de solo; vegetação; imagens orbitais; fotografias aéreas entre outros (Silva, 2003).

A representação vetorial tem a característica de exibir uma coleção de pontos para definir um ponto, linha ou polígono que descreve a forma e tamanho das características de uma dada área geográfica. Trata-se de uma representação particularmente usada para mostrar tipos de dados discretos. Algumas informações de maior complexidade podem ser armazenadas com grande eficiência neste tipo de representação (Silva, 2003).

3.2.1. Sistemas de Informações Geográficas em Estudos Costeiros

Num país de dimensão continental como o Brasil, com uma grande carência de informações adequadas para a tomada de decisões sobre os problemas urbanos, rurais e ambientais, os sistemas de informações georreferenciadas apresentam um enorme potencial, por reunirem tecnologias de custo relativamente baixo (Câmara *et al.*, 1999).

Um SIG combina as tecnologias de manejo de banco de dados com cartografia digital e permite que feições mapeadas sejam referenciadas geograficamente, possuindo conexão lógica com atributos espaciais (Câmara, 1994). Por consequência essa ferramenta pode representar parâmetros ambientais relacionados a fenômeno em estudo, estabelecendo padrões e relações espaciais.

Em estudos costeiros, os SIG's podem ser utilizados numa gama de aplicações, especialmente, no monitoramento, mapeamento de ambientes, na prevenção e avaliação de acidentes ocorridos num litoral, na produção de cartas de sensibilidade ao derramamento de óleo, etc. Segundo Noernberg & Lana (2002), em aplicações costeiras os sistemas georreferenciados podem ser implementados, pelo menos, de três grandes maneiras:

- como ferramenta para produção de mapas;
- como suporte para análise espacial e modelagem de fenômenos;
- como um banco de dados geográficos, com funções de armazenamento e recuperação de informação espacial.

No monitoramento de fenômenos costeiros, os bancos de dados georreferenciados podem registrar, mapear e quantificar com precisão, diferentes posições de processos erosivos e acrecionários em planícies costeiras (França & Souza Filho, 2003), expressando essas variáveis em distâncias lineares, taxas e percentagens (Gowda *et al.*, 1995; Souza Filho *et al.*, 2006).

No mapeamento de ambientes e formas costeiras, um SIG construído a partir de imagens de sensores remotos constitui a melhor estrutura de análise espacial integrada, por combinar diferentes conjuntos de dados e interpretá-los a partir de relações espaciais estabelecidas entre as variáveis ambientais, o que pode garantir um mapeamento de maneira rápida e acessível, tão necessário para tomada de decisões de gestores públicos em ações de gerenciamento da zona costeira (Souza Filho, 2000).

Para as regiões com risco de acidentes, um SIG pode estabelecer três níveis ou tipos de informação: medidas e mapas de parâmetros ambientais; dados obtidos do monitoramento ambiental; e saída de dados tratados para entrada em modelos ambientais (Noernberg & Lana, 2002). Nesta situação um banco de dados SIG facilita consideravelmente as ações de manejo em situações emergenciais (Noernberg & Lana, 2002).

CAPÍTULO 4

4. SISTEMAS SENSORES UTILIZADOS NESTA PESQUISA

A seguir são apresentadas as principais características dos sistemas sensores óptico e de radar avaliados neste trabalho, especificamente são enfocados os Sistemas *Land User Satellit* (Landsat), Programa RADARSAT, *Japanese Earth Satellite-1* (JERS-1), e *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM).

4.1. SENSORIAMENTO REMOTO ÓPTICO

4.1.1. O Programa Landsat

A primeira série do satélite Landsat, denominado na época de ERST-1 (Earth Resources Technology Satellite – 1) teve início no ano de 1972. Este programa desenvolvido pela NASA foi concebido com objetivo de coletar dados sobre recursos naturais terrestres (Novo, 1992).

Até o presente momento, o sistema Landsat compõe-se de uma série de 7 satélites (Landsat 1,2,3,4,5,6 e 7), estando atualmente em funcionamento apenas o satélite Landsat 5. Na série de satélites Landsat 1, 2 e 3, o subsistema de varredura acoplado foi o imageador multiespectral MSS (Multiespectral Scanner Subsystem), que recobre a superfície terrestre em faixas de 185 Km, perpendicularmente à órbita do satélite, em cinco (5) diferentes faixas do espectro eletromagnético (**Tabela 4.1**).

Tabela 4.1 – Principais características do Subsistema MSS/Landsat.

SENSOR MSS (Landsat 1, 2 e 3)		
Banda	Faixa Espectral (μm)	Região do Espectro
4	0,5 – 0,6	Visível (verde)
5	0,6 – 0,7	Visível (vermelho)
6	0,7 – 0,8	IV próximo
7	0,8 – 1,1	IV próximo
8	10,4 – 12,6	IV termal

Fonte: Novo (1992).

Os três satélites apresentam como aspecto comum, resolução espacial nominal de 79m x 79m nas regiões do visível e infravermelho refletido e de 240m x 240m na região do termal. A órbita dos sistemas era circular, quase polar, síncrona com o Sol, a uma altitude aproximada de 920 Km, com ângulo de inclinação da órbita do satélite em relação ao plano do Equador de 99°11". Para uma órbita, eram necessários 103 minutos e 27 segundos, o que perfaz 14 órbitas por dia. O período de revisita dos sistemas era de 18 dias e a passagem pelo Equador ocorria às 9:30 h (hora local). Todas as imagens geradas pela série de satélites Landsat apresentam uma resolução radiométrica de 8 bits, o que equivale a 256 níveis de cinza (Moreira, 2003).

A partir do satélite Landsat 4 e 5, foi acoplado o sensor TM (Thematic Mapper) que opera em sete faixas ou bandas espectrais, sendo três na faixa do visível, três na região do infravermelho e uma na faixa do termal (Tabela 2). Em comparação com o MSS, o TM é caracterizado por uma resolução espacial de 30 m (visível, infravermelho próximo e médio) e de 120 m (canal térmico).

No sistema Landsat 7, lançado em 1999, foi acrescentado um detector que opera numa banda pancromática (2,08-2,35 μm), com resolução espacial de 15 metros, denominado sensor ETM+. Houveram também modificações no comprimento de onda de algumas bandas espectrais (Tabela 4.2).

Tabela 4.2 – Características espectrais dos sensores TM/ETM⁺ do Landsat 4, 5 e 7.

SENSOR TM (Landsat 4 e 5)		SENSOR ETM ⁺ (Landsat 7)	
Banda	Faixa Espectral (μm)	Região do Espectro	Faixa Espectral (μm)
1	0,45 – 0,52	Visível (azul)	0,45 – 0,52
2	0,52 – 0,60	Visível (verde)	0,53 – 0,61
3	0,63 – 0,69	Visível (vermelho)	0,63 – 0,69
4	0,76 – 0,90	IV próximo	0,76 – 0,90
5	1,55 – 1,75	IV médio	1,55 – 1,75
6	10,4 – 12,5	IV termal	10,4 – 12,5
7	2,08 – 2,35	IV médio	2,08 – 2,35
8	inexistente	Visível e IV próximo	0,52 – 0,90

Fonte: Moreira (2003)

Considerando as características espaciais, espectrais e temporais dos sensores TM e ETM+ do sistema Landsat, suas imagens representam importantes fontes de informação para projetos de estudos ambientais, especialmente, em aplicações de conhecimento e monitoramento sobre aspectos agrícolas, florestais, oceanográficos e geológicos.

Nas últimas décadas, aplicações voltadas para estudos de fenômenos costeiros e oceanográficos, utilizando dados Landsat têm demonstrado a relevância desta plataforma como uma importante ferramenta, devido sua versatilidade, especialmente por suas características de resolução espacial, espectral e temporal.

4.1.1.1. Características dos produtos Landsat utilizados nesta pesquisa

Para aquisição das imagens digitais Landsat foram considerados a boa visibilidade, pouca ocorrência de nuvens e a disponibilidade das imagens. Consideraram-se, também, os objetivos deste estudo, ou seja, quais imagens disponíveis do sensor eram mais adequadas para estudos de mapeamento e de avaliação multi-temporal. Na **Tabela 4.3** encontram-se detalhados as características e parâmetros das imagens Landsat utilizadas.

Tabela 4.3: Características das imagens Landsat utilizadas nesta pesquisa.

Sensor/ Plataforma	Data de Aquisição	Resolução espacial (m)	Bandas Espectrais	Finalidade
MSS/Landsat 2	15/08/1980	79	5, 6,7	Análise multi-temporal
TM/Landsat 4	16/10/1992	30	3,4,5	Análise multi-temporal
ETM/Landsat 7	11/09/2000	30	Todas	Mapeamento e análise multi-temporal

4.2. SENSORIAMENTO REMOTO NAS MICROONDAS: SISTEMAS IMAGEADORES COM RADAR

Denomina-se de RADAR (*Radio Detection and Ranging*), o conjunto de sensores imageadores em rádio-frequência que operam na faixa de comprimento de onda entre 1mm a 1m (Raney, 1998). Apresentam iluminação própria, não dependendo do sol como fonte de energia para coleta de dados terrestres, bem como são pouco influenciados pelas condições atmosféricas adversas, tais como: presença de nuvens, bruma ou fumaça (Lewis *et al.*, 1998).

Diferentemente dos sensores ópticos que coletam informações químicas e biológicas dos alvos, os radares imageadores registram informações ligadas a geometria do terreno, isto é, sua macro, microtopografia e constante dielétrica (Elachi, 1997). Em um sistema SAR os parâmetros do alvo que influem no sinal de retorno estão diretamente relacionados com as suas propriedades geométricas e dielétricas: umidade do solo, rugosidade do terreno, relevo, estrutura da vegetação e quantidade de água presente nas folhas verdes (Lewis *et al.*, 1998). Isto é devido a geometria de imageamento, que acontece em visada lateral, sendo a superfície "iluminada" em faixas contínuas paralelas em direção ao movimento da plataforma. O funcionamento deste sistema é baseado na emissão de pulso de microondas e registro do sinal de retorno (Moreira, 2003).

Do ponto de vista do funcionamento do sistema, os radares imageadores compreendem os sistemas de antena rotatória e os de visada lateral (SLAR - *Side Looking Airborne Radar*). A definição de SLAR engloba dois tipos de radar: o de abertura real (RAR - *Real Aperture Radar*) e o de abertura sintética (SAR- *Synthetic Aperture Radar*).

A diferença entre o RAR e o SAR está basicamente no processamento do sinal retornado e na resolução azimutal. O SAR utiliza a informação de uma seqüência inteira de pulsos ao longo da direção azimutal (e não apenas um pulso como num RAR). Para produzir uma faixa imageada, o SAR usa o efeito *Doppler* (baseado no deslocamento da plataforma) e o histórico das mudanças de fase a ele associado para simular uma antena cujo comprimento é muitas vezes maior que o da antena real (Dutra *et al.*, 2003). Este processo eletrônico simula a existência de uma antena com tamanho superior a instalada, daí o termo "abertura sintética". A resolução azimutal no SAR é independente da largura do pulso transmitido e é aproximadamente igual à metade do tamanho físico da antena.

Para um melhor aproveitamento dos dados produzidos por um radar, é necessário, entre outros fatores, o entendimento dos parâmetros envolvidos no processo de aquisição e geração das imagens, tais como: o comprimento de onda, polarização, direção ou azimute de visada, ângulo de incidência e resolução espacial (Paradella *et al.*, 2005; Souza Filho *et al.*, 2005a).

4.2.1. Características operacionais dos sistemas de RADAR

4.2.1.1. Comprimento de onda

Corresponde à distância que a onda trafega no tempo requerido para gerar um ciclo (Lewis *et al.*, 1998). Num imageador SAR, os comprimentos de ondas (λ) variam de 1mm a 1m. As suas principais bandas são: X, C, S, L e P (**Tabela 4.4**). Essas denominações não possuem nenhum significado lógico e foram definidas por militares nos estágios iniciais da pesquisa por razões de segurança (Jensen, 2000).

Tabela 4.4 – Comprimento de onda de RADAR e frequências usadas em pesquisas de sensoriamento remoto de microondas ativas

Designação das Bandas	Comprimento de onda (em cm)	Frequência (em GHz)
Ka	0,75 – 1,18	40,0 – 26,5
K	1,18 – 1,67	26,5 – 18,0
Ku	1,67 – 2,4	18,0 – 12,5
X	2,4 – 3,8	12,5 – 8,0
C	3,8 – 7,5	8,0 – 4,0
S	7,5 – 15	4,0 – 2,0
L	15 – 30	2,0 – 1,0
P	30 - 70	1,0 – 0,3

Fonte: Jensen, 2000.

Além do comprimento de onda, constituem atributos do sinal retroespalhado, ou seja, a resposta espectral do alvo ao pulso emitido, **a amplitude** que é o máximo desvio em altura da onda e **a fase**, que equivale a posição de um ponto de vibração no senóide e a direção de movimento, em relação a um datum ou posição de referência (Lewis *et al.*, 1998).

4.2.1.2. Polarização

Outra fonte importante de informação de um SAR é a polarização. Esta é definida como a orientação segundo a qual oscila, no tempo, o vetor campo elétrico da onda eletromagnética. Esta orientação pode determinar uma polarização do tipo linear, circular ou elíptica (Dutra *et al.*, 2003).

A polarização é dita linear quando a orientação do campo elétrico varia segundo uma linha reta, que pode ainda ser horizontal ou vertical. Por sua vez, a onda eletromagnética é dita horizontalmente polarizada quando o vetor do campo elétrico é perpendicular ao plano de incidência da onda (plano que contém o vetor normal à superfície e o vetor de propagação da onda) ou de maneira geral, quando o vetor do campo elétrico é paralelo à superfície imageada.

Usualmente, os sistemas de radar utilizam polarizações lineares paralelas, HH e VV, ou cruzadas, HV e VH (a primeira letra refere-se à polarização da radiação transmitida e a segunda à polarização da radiação recebida pela antena). Segundo Paradella *et al.* (2005), imageamentos com radares polarizados linearmente são os mais comuns (RADARSAT-1, JERS-1, ERS-1 e 2), operando com microondas polarizadas horizontalmente (H) ou verticalmente (V) é registrando somente a amplitude do sinal recebido, ou seja, a componente V e/ou H.

4.2.1.3. Direção ou azimute de visada

Direção de visada ou azimute de visada é definido como o ângulo entre o norte geográfico e a direção de apontamento do feixe de iluminação do radar em sentido horário, isto é, perpendicular à direção de movimento da plataforma ou do traçado da órbita (Lewis *et al.*, 1998).

O ângulo ou azimute de visada é um detalhe muito importante presente apenas num sistema SAR, pois em imagens orbitais, esta flexibilidade não existe, considerando que o imageamento segue restrições do traçado orbital da plataforma, que nem sempre é ideal para determinada finalidade.

Neste sentido, a direção de visada influencia nos mecanismos e no volume do retroespanhamento de um alvo. Segundo Paradella *et al.* (2000), os melhores resultados no realce das feições superficiais são obtidos quando as principais direções das estruturas e feições do relevo são ortogonais à direção da visada.

4.2.1.4. Ângulo de incidência

O ângulo de incidência é um dos principais fatores que influenciam o retroespalhamento e a aparência dos objetos numa imagem de radar. O ângulo de incidência refere-se ao ângulo entre a iluminação do radar e a nadir (Raney, 1998). Por sua vez, o ângulo de visada ou de incidência local está diretamente ligado com as características do relevo local do terreno em qualquer ponto dentro da imagem. É o ângulo entre a iluminação do radar e a linha perpendicular ao terreno (**Figura 4.1**).

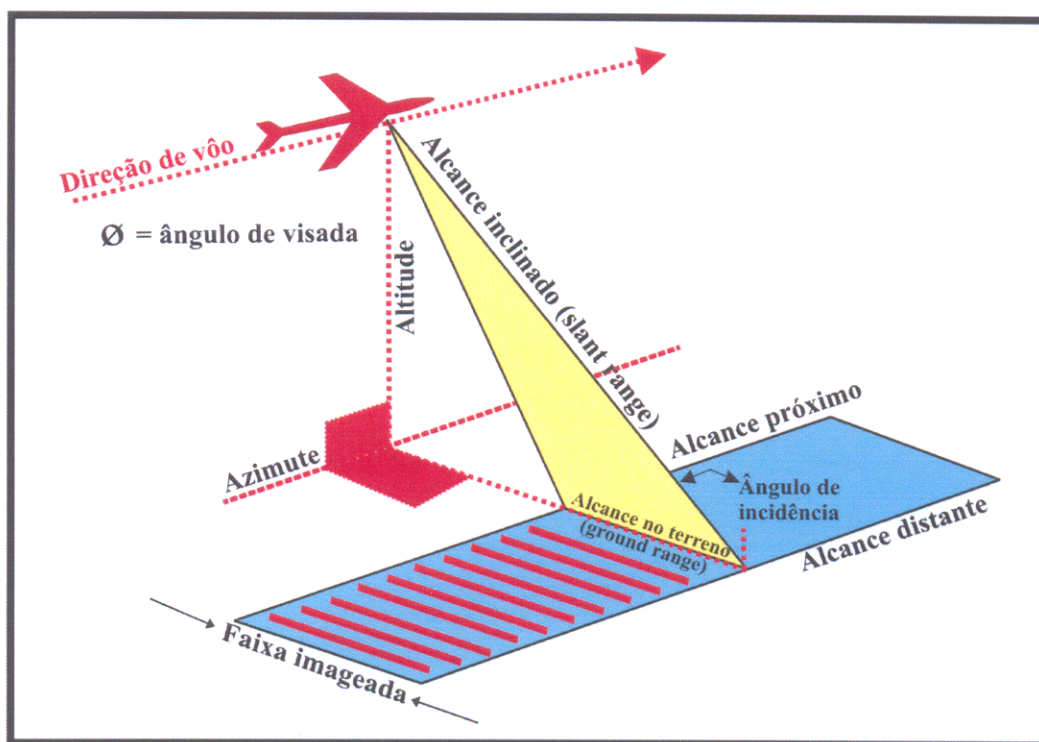


Figura 4.1 – Geometria de imageamento de um sistema SAR. Fonte: Raney (1998).

De maneira geral, o ângulo de incidência define o realce das estruturas na imagem. Normalmente em terrenos planos, obtém-se maximização de variações topográficas com o uso de baixos ângulos de incidência. De modo contrário, em topografias com relevos acidentados, os melhores realces estão nas imagens sob ângulos de incidência elevados.

Deste modo, para utilização de imagens SAR em levantamentos de regiões costeiras, os ângulos de incidências mais indicados são ou menores, geralmente, aqueles entre 20° - 30°.

4.2.1.5. Resolução espacial.

Resolução espacial é definida como a menor distância na qual se podem separar dois alvos. Num sistema SAR, a resolução espacial é diferente para as direções paralela ao vôo ("along track" ou azimutal) e perpendicular ao vôo ("cross track" ou range) (Lewis *et al.*, 1998).

A resolução medida em range é diretamente proporcional à largura do pulso transmitido, ou seja, corresponde a distância entre o início e o final do pulso em um plano inclinado, circulares, centralizados ao sensor. Mantem-se constante em toda a faixa imageada (do near ao far range). Por sua vez, a resolução em azimute é determinada pela largura da metade da potência do feixe azimutal sintetizado, sendo inversamente proporcional ao tamanho da antena e diretamente proporcional à largura do feixe em azimute. O tamanho da antena determina a largura do feixe em azimute e conseqüentemente impõe limites a resolução azimutal num sistema RAR (Raney, 1998).

4.2.2. – Propriedades da superfície

4.2.2.1. Constante dielétrica e teor de umidade

A constante dielétrica é uma medida das propriedades elétricas dos materiais, estando relacionada com interação energia-matéria (capacidade de uma matéria em absorver, refletir e transmitir a radiação eletromagnética). Na região das microondas, a constante dielétrica varia de 3 a 8 na maioria dos materiais naturais, quando secos; e a água tem uma constante dielétrica de aproximadamente 80 (Lewis *et al.*, 1998). Um alto conteúdo de umidade na superfície implica em uma constante dielétrica elevada, alta refletividade do radar e, potencialmente, um alto sinal de retorno. A conseqüência será uma imagem de radar com elevado brilho. De forma contrária, um conteúdo de umidade baixo, implica em uma constante dielétrica reduzida e em um baixo sinal de retorno, ou seja, a uma maior penetração das microondas na superfície. A penetração do sinal na superfície é inversamente proporcional ao conteúdo de umidade (Silva, 2002).

4.2.2.2. Rugosidade da superfície

A rugosidade superficial é uma propriedade inerente a interação entre o comprimento de onda emitida pelo sensor SAR, ao ângulo de incidência desta energia e a estrutura física da superfície imageada. A rugosidade superficial do terreno pode variar em, pelo menos, dois níveis, que vão desde grande até pequenas escalas. Em grande escala, a rugosidade equivale a macrotopografia, ou seja, ao relevo topográfico, estando relacionada com estruturas e a geomorfologia do terreno, as quais podem ser medidas em dezenas a centenas de metros; inclui feições como montanhas, vales e encostas. A componente de pequena escala (microtopografia) refere-se à rugosidade superficial determinada pelas feições texturais superficiais, medidas em milímetros ou centímetros (Lewis *et al.*, 1998).

Tanto em macro, quanto em microtopografia, uma superfície apresenta-se lisa numa imagem de radar quando apresenta reflexão especular, ou seja, essencialmente nenhuma radiação é retroespalhada. À medida que uma superfície vai se tornando rugosa, uma pequena fração da energia incidente é retroespalhada em todas as direções incluindo na direção do sensor (Raney, 1998).

4.2.3. Programa JERS-1

O Japanese Earth Satellite-1 (JERS-1), lançado em fevereiro de 1992, foi o primeiro satélite de sensoriamento remoto com capacidade multisensorial, aliando sensores na faixa óptica (três bandas no visível e infravermelho próximo e quatro no infravermelho médio), com sensor radar de abertura sintética (SAR), na banda L (GRFM, 1998). As especificações técnicas do sistema, órbita e dimensões físicas da plataforma encontram-se dispostas na **Tabela 4.5**.

Por ocasião do Projeto Global Rain Forest Mapping (GRFM), foram processados em meio digital, mosaicos de imagens JERS-1 de toda América do Sul situada na faixa tropical, com cobertura igual a 5° de latitude por 5° de longitude e resolução espacial reescalada de 18 para 90 metros (Siqueira *et al.*, 2000).

Tabela 4.5 – Características e especificações técnicas do Sistema JERS-1.

Características da Missão	
Instituição Responsável	National Space Development Agency of Japan (NASDA)
Satélite	JERS-1
Lançamento	11/02/1992
Situação Atual	Inativo desde 11/10/1998
Especificações Técnicas do Sistema	
Frequência	1.275 GHz
Comprimento de onda	23.5 cm (Banda L)
Polarização	HH (horizontal)
Ângulo de incidência	33°
Tamanho do pixel	12,5 x 12,5m (Sensor SAR)
Características da Órbita	
Geometria	Polar, heliossíncrona
Altitude	570 Km
Inclinação	97,7°
Período de cada órbita	96 min
Revisita do sistema	44 dias

Fonte: GRFM (1998)

O GRFM foi um projeto internacional desenvolvido pela National Space Development Agency of Japan e Earth Observation Research Center (NASDA/EORC) com a colaboração dos órgãos internacionais: NASA/Jet Propulsion Laboratory (JPL), Space Applications Institute of the Joint Research Centre of the European Commission (JRC/SAI), Alaska SAR Facility (ASF), Earth Remote Sensing Data Analysis Center of Japan (ERSDAC) e Remote Sensing Technology Center of Japan (RESTEC). O projeto contou também com significativa participação da University of California Santa Barbara (UCSB), do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e do Instituto Nacional e Pesquisas da Amazônia (INPA).

O GRFM para a América do Sul teve como principal objetivo a cobertura global da Amazônia por mosaico de imagens do satélite em duas épocas distintas: o período da cheia e o período da vazante, que acontecem, geralmente, no primeiro e segundo semestres do ano, respectivamente (Freeman *et al.*, 2002). O projeto contou também com a elaboração de mapas temáticos em nível continental e estudos intensivos, em áreas selecionadas, para mapeamento fino de uso do solo (Rosenqvist, *et al.*, 2000)

Sendo um RADAR que opera na banda-L, o sensor é sensível a estruturas da ordem de 23cm (comprimento de onda da banda L). Neste comprimento de onda, freqüentemente, a radiação transmitida pelo JERS-1 passa pelas camadas mais altas da vegetação e atinge a

superfície, apesar dos troncos das árvores serem bons espalhadores. Deste modo, podem-se obter reflexões duplicadas (*double bounce*) de florestas inundadas, quando as ondas de rádio interagem com os troncos das árvores e da superfície lisa refletora da água (**Figura 4.2.A**). De modo similar, em áreas urbanas são obtidas reflexões duplicadas, já que as ondas refletem nas ruas e, então, nos edifícios, e retornam ao sensor (**Figura 4.2.B**).

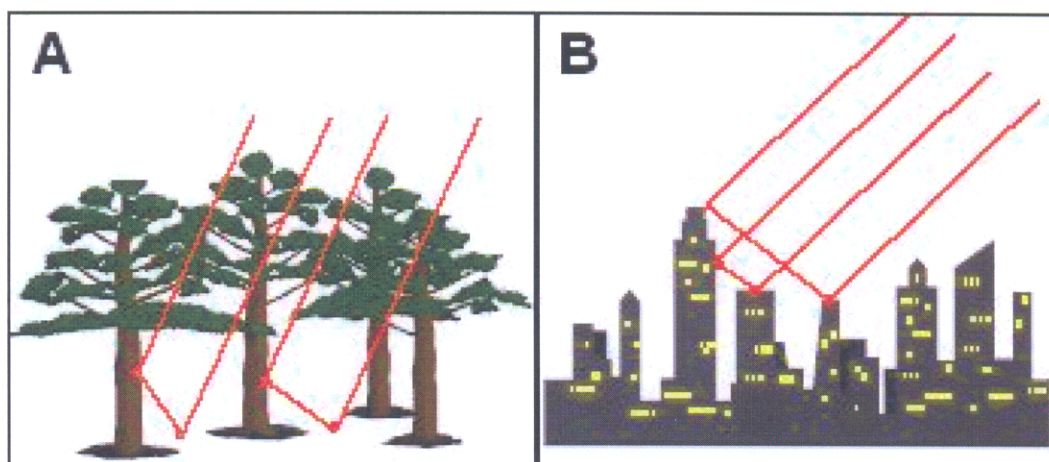


Figura 4.2 - Esquema demonstrado o efeito da reflexão de canto (*double bounce*), onde **A**) o pulso de microondas interage com o caule da vegetação e a superfície e; **B**) interação da energia com alvos urbanos (edificações). Adaptado de Lewis *et al.* (1998).

Em geral, o brilho de uma imagem SAR depende da geometria iluminada e da natureza do espalhamento das ondas de rádio dos alvos. Quando não há muita vegetação, por exemplo, o solo ficará bastante liso sob a perspectiva de um comprimento de onda de 23 cm do sistema JERS-1. A maioria das ondas de rádio será refletida para longe do RADAR, isto fará com que essas áreas na imagem pareçam escuras. Pela mesma razão, rios e massas d'água, como reservatórios, lagos e lagoas, apresentam-se bem escuros na imagem. As florestas são usualmente bem brilhantes, porque as ondas de rádio são espalhadas difusamente, com uma boa quantidade sendo refletida de volta ao sensor.

4.2.3.1. Características das imagens JERS-1 utilizadas:

Neste trabalho, a escolha do uso de imagens de RADAR do satélite japonês JERS - 1, tipo SAR foi feita buscando a obtenção de informações da área de estudo no período chuvoso. As características dos produtos utilizados constam da **Tabela 4.6**.

Tabela 4.6 - Características das imagens JERS-1 utilizadas.

Mosaico	Data de Aquisição	Latitude canto superior esquerdo	Longitude canto superior esquerdo
GRFM AM-1 (105)	Maio de 1996	5° N	55° W

4.2.4. Programa RADARSAT:

O projeto RADARSAT foi criado em 1989 pela Agência Espacial Canadense, sendo que, em novembro de 1995, foi lançado o primeiro satélite, o Radarsat-1. As especificações técnicas do sistema, órbita e dimensões físicas da plataforma encontram-se dispostas na **Tabela 4.7**.

Tabela 4.7 – Características e especificações técnicas do Sistema RADARSAT-1.

Características do Satélite	
Massa de Lançamento	2750 Kg
Potência Solar	3.5 kW
Baterias	48 amper-hora
Especificações Técnicas do Sistema	
Frequência	5.3 GHz
Comprimento de onda	5.6 cm (Banda C)
Polarização	HH (horizontal)
Características da Órbita	
Geometria	Circular, sol-síncrona
Altitude	798 Km
Inclinação	98,6°
Órbita por dia	14
Período de cada órbita	100.9 min
Revisita do sistema	24 dias

Fonte: RADARSAT-1 Internacional (1995).

Usando uma única frequência na banda C (5,3 GHz), o RADARSAT apresenta características de imageamento bastante peculiares, podendo obter imagens com resolução espacial variando de 10 a 100 metros, com faixas de varredura que variam de 50 a 500 Km, com ângulos de incidência variando de menos de 20 graus a mais de 50 graus (**Figura 4.3**).

O imageamento do satélite oferece cobertura global em órbita polar síncrona com o Sol, com revisita a um local a cada 24 dias, sendo que pode oferecer cobertura diária do Ártico,

observar qualquer parte do Canadá a cada três dias e obter cobertura completa de latitudes equatoriais a cada seis dias utilizando a varredura de 500km.

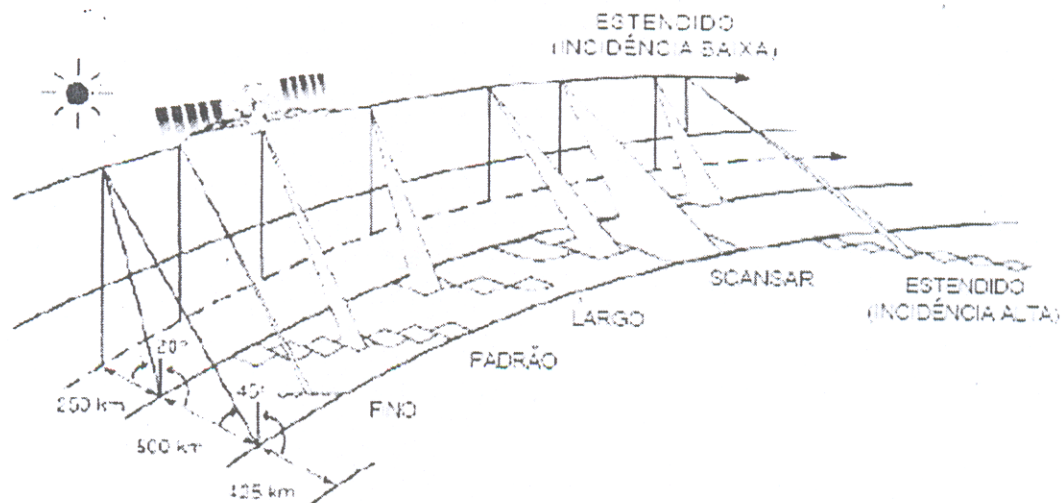


Figura 4.3 - Modos de imageamento do Sistema RADARSAT-1. Fonte: RADARSAT-1 Internacional (1995)

O RADARSAT-1 possui dois azimutes de visada, para oeste e para leste. Quando o satélite desce do pólo norte (órbita descendente), ele imageia a Terra na direção oeste (em torno de 282° de azimute de visada) e quando ascende do pólo sul (órbita ascendente), ele passa a imagear na direção leste (em torno de 78° de azimute de visada). A obtenção de imagens com visadas opostas possibilita a formação de pares estéreos, proporcionando uma perspectiva tridimensional das formas do terreno assim como, a extração de DEMs-Modelos Digitais de Elevação. Neste sentido, a direção da visada de iluminação do sistema poderá afetar o realce e identificação de estruturas do terreno. De modo que, feições lineares são realçadas quando estão alinhadas próximo à perpendicular do azimute de visada do satélite. Ao contrário, feições podem ser suprimidas se alinhadas paralelas à direção de visada (Paradella *et al.*, 2000).

A resolução espacial, a largura da faixa imageada e o ângulo de incidência são parâmetros variáveis neste sistema e possibilitam que sejam gerados 35 produtos com características diferenciadas (**Tabela 4.8**).

Tabela 4.8 – Características dos modos de operação do RADARSAT-1.

MODO	POSIÇÃO	ÁREA IMAGEADA (Km)	ÂNGULO DE INCIDÊNCIA	RESOLUÇÃO ESPACIAL	N.º DE LOOKS	
FINE	F1	50 x 50	34° - 40°	9,1 x 8,4	1 x 1	
	F2		39° - 42°	8,7 x 8,4		
	F3		41° - 44°	8,4 x 8,4		
	F4		43° - 46°	8,1 x 8,4		
	F5		45° - 48°	7,8 x 8,4		
STANDARD	S1	100 X 100	20° - 27°	26,0 x 27,0	1 x 4	
	S2		24° - 31°	22,0 x 27,0		
	S3		30° - 37°	27,6 x 27,0		
	S4		34° - 40°	25,7 x 27,0		
	S5		36° - 42°	24,2 x 27,0		
	S6		41° - 46°	22,1 x 27,0		
	S7		45° - 49°	20,1 x 27,0		
WIDE	W1	150 X 150	20° - 31°	35,5 x 27,0	1 x 4	
	W2		31° - 39°	26,6 x 27,0		
	W3		39° - 45°	22,8 x 27,0		
SCANSAR	NARROW	300 X 300	20° - 40°	73,5 x 47,8	2 x 2	
			SN2	31° - 46°		55,1 x 71,1
	WIDE	500 X 500	SW1	20° - 49°	146,6 x 93,1	2 x 4
			SW2	20° - 46°		
EXTENDED		75 X 75	H1	49° - 52°	19,8 x 27,0	1 x 4
			H2	50° - 53°	19,4 x 27,0	
			H3	52° - 55°	19,1 x 27,0	
			H4	54° - 57°	18,5 x 27,0	
			H5	56° - 68°	18,2 x 27,0	
			H6	57° - 59°	18,0 x 27,0	
	LOW	L1	170 X 170	10° - 31°	35,5 x 27,0	

Fonte: RADARSAT-1 Internacional (1995).

4.2.4.1. Características da imagem SAR/RADARSAT-1 utilizada:

Foi utilizada uma cena do sensor SAR/RADARSAT-1, Adquirida em 08/01/2003 (período chuvoso), em modo *wide*, órbita descendente, com ângulo de incidência de 20° - 31° (*near - far range*) e tamanho de pixel igual a 12,5 metros.

4.2.5. A missão SRTM:

A missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), projetada e instituída pelas agências americanas NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) e NIMA (*National Imaging and Mapping Agency*), com participação das agências espaciais DLR (*Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt*) da Alemanha e ASI (*Agenzia Spaziale Italiana*) da Itália, consistiu num levantamento interferométrico realizado em escala global, com um instrumento SAR, no período de 11 a 22 de fevereiro de 2000 (Kellndorfer *et al.*, 2004).

A bordo do ônibus espacial *Endeavor*, cerca de 80% do planeta, entre as latitudes de 60° norte e 56° sul foi recoberto e deste montante, 99,97% ou 119.51 milhões de Km² foram mapeados com efetiva disponibilização dos dados através de modelos digitais de elevação-MDE's (Rabus *et al.*, 2003). Foram produzidos modelos tridimensionais com 01 e 03 arcos de segundos, grade de 30 metros (SRTM1) e 90 metros (SRTM 3), respectivamente (Chien, 2000).

O método utilizado para geração do DEM, nesse caso, foi a interferometria de radar, o qual consiste na extração de informações altimétricas, a partir das propriedades de coerência do Radar de Abertura Sintética (SAR), no momento da tomada de um mesmo ponto na superfície terrestre por duas antenas localizadas em diferentes posições (Toutin & Gray, 2000). A informação produzida em diferentes fases nas imagens geradas pelo SAR é usada para mensurar precisamente o range de cada imagem, sendo que a comparação dos ângulos e distâncias produzidos neste processo poderá mensurar a altimetria do terreno (Toutin & Gray, 2000).

No caso da missão SRTM, o processo de geração do DEM foi baseado num sistema SAR interferométrico, que operou nas bandas C (3,1 cm) e X (5,6 cm), acoplado à nave através de duas antenas SAR receptoras nas referidas bandas espectrais (Chien, 2000). Os DEM's relativos à banda C estão sendo distribuídos gratuitamente pela NASA para toda a América do Sul com resolução espacial de 90 x 90 metros. Segundo Rabus *et al.* (2003), estes dados apresentam, em 90% dos casos, precisão vertical relativa e absoluta, de $\pm 6m$ e $\pm 16m$, respectivamente.

Os arquivos originais estão em formato raster, com resolução radiométrica de 16 bits, em arquivos do tipo "HGT". As imagens foram georreferenciadas, sendo adotada a projeção cartográfica geográfica, com elevações referenciadas para o geóide WGS84 e *datum* horizontal WGS84.

Considerando a qualidade do DEM gerado pela missão SRTM, sua gratuidade bem como, a ausência de informações cartográficas sistematizadas sobre o relevo amazônico, tais produtos constituem-se numa importante fonte de informações para caracterização de unidades morfológicas e tipologias de relevo. Portanto, podem ser utilizados na percepção da distribuição vertical de ambientes costeiros (Souza Filho *et al.*, 2005b).

4.2.5.1. Características dos produtos SRTM utilizados:

Foram utilizadas 4 cenas produzidas pela missão SRTM, as quais correspondem aos arquivos hgt N03W051, N03W052, N04W051 e N04W052, todas coletadas no período de 11 à 22 de fevereiro de 2000. As características e parâmetros das cenas utilizadas encontram-se dispostas na tabela abaixo:

Tabela 4.9 - Características dos produtos SRTM utilizados na pesquisa.

Sensor/ Plataforma	Data de Aquisição	Angulo de incidência	Resolução espacial (m)	Swath (km)	Banda Espectral
Endeavour / InSAR	Fevereiro de 2000	17° - 65°	90	111	C (3,1 cm)

As referidas cenas foram adquiridas mediante *download* do *site* da NASA. (http://www.jpl.nasa.gov/srtm/southamerica_radar_imagens.html).

CAPÍTULO 5

RECONHECIMENTO E MAPEAMENTO DE AMBIENTES COSTEIROS EM CABOS LAMOSOS (CASSIPORÉ E ORANGE-AP), A PARTIR DE DADOS DE SENSORES REMOTOS E SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS (SIG).

RESUMO

O objetivo deste capítulo é avaliar o potencial de uso dos dados de sensoriamento remoto para o reconhecimento e mapeamento geológico e geomorfológico de semi detalhe em planície costeira dominada por processos fluviais e sedimentos lamosos. Para tanto, valeu-se do uso de imagens de sensores remotos óptico (Landsat ETM 7) e nas microondas (RADARSAT-1, JERS-1 e SRTM), com diferentes características espectrais e resoluções espaciais, para o estudo dos ambientes costeiros tropicais desenvolvidos na região dos cabos Cassiporé e Orange, ambos no extremo norte do Brasil. Aqui, são apresentadas e discutidas as técnicas de processamento digital de imagens (correções atmosféricas, radiométricas, geométricas e de realces) bem como, de interpretação e mapeamento de dados digitais através da utilização de um Sistema de Informação Geográfica – SIG, estruturado a partir do software ArcView 3.3. Na abordagem, os multi-sensores empregados proporcionaram o reconhecimento e o mapeamento de três domínios geomorfológicos: planalto, planície aluvial e planície costeira. A planície costeira no local é representada pelas sub-unidades: a) planície lamosa de supramaré (campos alagáveis de supramaré), planície lamosa de intermaré (manguezais de intermaré e bancos de lama - "*tidal mudflats*"). Por sua vez, a planície aluvial é constituída pelos pântanos de água doce (*fresh marsh* e *fresh swamp*), lagos, depósitos de barras e pela planície de inundação fluvial do curso superior dos rios.

PALAVRAS-CHAVES: mapeamento costeiro, Landsat ETM, RADARSAT-1, JERS-1, SRTM, cabos lamosos, Amapá, Amazônia.

5.1. INTRODUÇÃO

Ambientes costeiros são regiões onde ocorre a interação de processos continentais com processos marinhos, onde são observados estuários, deltas, praias, ilhas barreira, planícies de maré, entre outros (Summerfield, 1991). Dada a importância ecológica e econômica das regiões costeiras, estudos visando reconhecê-las e monitorá-las, passaram, ao longo das últimas

décadas a fazer uso das geotecnologias, especialmente, do sensoriamento remoto, dos sistemas georreferenciados e da cartografia digital, por serem ferramentais de baixo custo, fácil uso e de grande potencialidade.

O sensoriamento remoto orbital apresenta vantagens por transmitir uma visão sinótica (visão do todo), em diversas épocas (multi-temporal), variadas resoluções espaciais, facilitando o conhecimento de ambientes, processos e formas costeiras (Novo, 1992). O emprego de imagens ópticas, tais como as TM e ETM Landsat abriu caminho para a obtenção de informações relacionadas com a composição físico-química dos alvos terrestres, possibilitando o mapeamento geomorfológico sistemático em diferentes faixas do espectro eletromagnético (visível, infravermelho próximo e médio), escalas e épocas do ano (Gowda *et al.* 1995, Ciavola *et al.*, 1999, Yang *et al.*, 1999, Souza Filho & Paradella, 2002, Froidefonde *et al.*, 2004, Fromard *et al.*, 2004).

No entanto, em regiões tropicais a constante cobertura de nuvens, bruma, chuva ou fumaça decorrente de queimadas, torna limitável a eficácia da utilização de dados de sensoriamento remoto óptico, fazendo com que os geocientistas passassem a incorporar em suas análises o sensoriamento remoto na faixa das microondas, ou seja, os Radares de Abertura Sintética-SAR (Prost, 1997, Kushwaha *et al.*, 2000, Souza Filho & Paradella, 2003, Souza Filho *et al.*, 2005a, 2005b),

Esta tecnologia além de superar tais barreiras, pois opera independentemente do sol e possui capacidade de imageamento com condições climáticas adversas (Lewis *et al.*, 1998), agrega informações ligadas com as propriedades geométricas (macro, micro-topografia ou rugosidade superficial) do alvo, delimitando estruturas geológicas com grande habilidade (Paradella *et al.*, 2000).

Atualmente, dados de sensores remotos têm sido amplamente armazenados, organizados e manipulados num banco de dados georreferenciado, constituindo um Sistema de Informações Geográficas-SIG (Goodchild, 1991) bem como, possibilitando a produção de mapas e a realização de complexas análises espaciais mediante o uso de medidas, cálculos estatísticos e relações matemáticas (Silva, 2003).

Situada em ambiente amazônico, o maior e mais bem preservado ecossistema tropical do mundo, a costa amapaense representa cerca de 7% de todo o litoral nacional, sendo caracterizada como uma planície freqüentemente inundável, afetada diretamente pela elevada

descarga hídrica e sedimentar do rio Amazonas, ventos alísios de nordeste e pela Zona de Convergência Intertropical-ZCIT (Nittrouer *et al.*, 1991).

O Amazonas está entre os três maiores rios do mundo em descarga de sedimentos, despejando 16% de toda a água doce descarregada nos oceanos (Oltman, 1968). Grande parte destes sedimentos, quando influenciados por correntes de maré e pela Corrente Costeira Norte Brasileira-CCNB, são transportados e depositados por cerca de 1600 Km de extensão, formando na costa do Amapá, Guiana Francesa e Suriname o mais longo e contínuo depósito de lama moderna do mundo (Allison & Lee, 2004).

O objetivo deste trabalho é reconhecer e mapear ambientes costeiros desenvolvidos na área do Parque Nacional do Cabo Orange, que inclui o cabo Cassiporé. A abordagem coloca-se como um desafio, considerando a complexidade dos processos atuantes no local e sua relação espacial com os ambientes costeiros em uma região remota, extensa e úmida, formada predominantemente por água doce.

O presente capítulo discute a contribuição dos produtos oriundos de sensores remotos ópticos e nas microondas, tais como imagens Landsat ETM 7, RADARSAT-1, JERS-1 e dados de elevação SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*), para reconhecimento e mapeamento dos diferentes ambientes costeiros existentes no extremo norte do Brasil.

5.2. ÁREA DE ESTUDO

A área estudada possui uma extensão de aproximadamente 130 Km, sendo representada pelos cabos lamosos Cassiporé e Orange. O primeiro localiza-se entre os rios Cassiporé e Uaçá, e o segundo entre o Rio Cassiporé e o Oceano Atlântico (**Figura 5.1**).

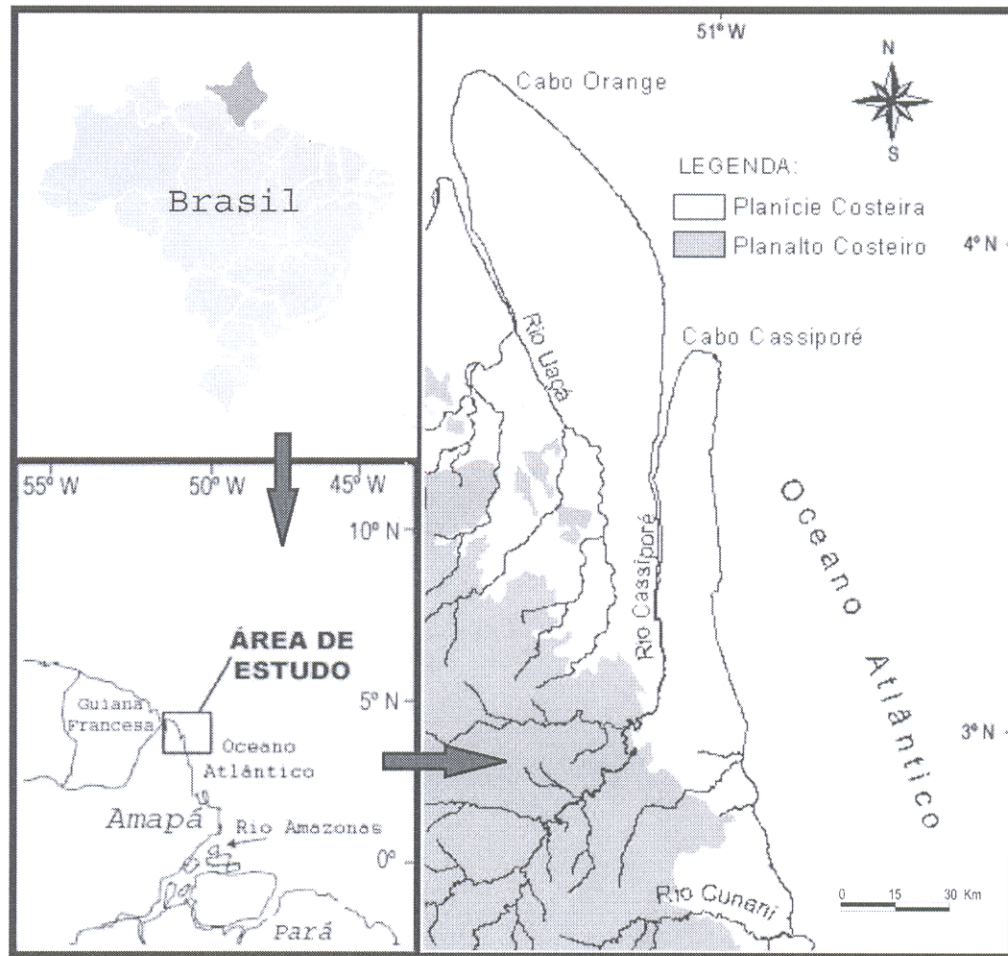


Figura 5.1: Localização da Área de Estudo, mostrando distribuição das unidades morfoestruturais Planalto e Planície Costeira (modificado de Allison *et al.*, 1995a)

Num cenário global, a faixa costeira norte amapaense ocupa posição equatorial (0° - 4° N), apresentando clima tropical úmido e superúmido, com médias térmicas anuais oscilando entre 26° e 28°C (Bezerra *et al.*, 1990) e precipitações pluviométricas superiores a 3.000 mm ao ano (ANA, 2004). O regime pluviométrico está diretamente relacionado com as duas estações existentes na região: uma bastante chuvosa, que vai desde janeiro até o mês de julho, seguida de uma estação subseca que começa em agosto e se prolonga até dezembro.

A planície costeira é formada por sedimentação holocênica argilo-siltosa, desenvolvida em sistema de leques aluviais, planícies fluviais, flúvio-marinhas, marinhas e lacustres (Lima *et al.*, 1991, Silveira, 1998). O baixo relevo ($< 5\text{m}$), de gradiente plano e pouco acidentado, abriga enormes campos arbustivos e herbáceos (IEPA/IBAMA, 2003). Na linha de costa e em ambientes flúvio-marinho, a ação da água salina e túrbida do Oceano Atlântico possibilita a

formação de bosques de manguezais, colonizados por espécies de siriúba (*Avicennia germinans*), mangue-vermelho (*Rhizophora mangle*) e mangue-amarelo ou branco (*Laguncularia sp*) (Schaeffer-Novelli *et al.*, 2000).

O contato da planície costeira com o planalto acontece em sentido NE-SW, quando a superfície baixa e constantemente alagável atinge os terrenos de idade proterozóica do Escudo das Guianas (Avelar, 2002, CPRM, 2004), sendo a paisagem alterada bruscamente devido a presença de afloramentos que podem atingir até 300 metros de altura.

A fisiografia dos cabos é marcada, ainda, pela atuação dos agentes hidrodinâmicos das marés, correntes de maré e pelas ondas. As marés são semidiurnas, apresentando regime de mesomarés (de 2 a 3 metros; DHN, 2004). A condição de alta energia, refletida em correntes de maré superiores a 1.0 m s^{-1} (Gabioux *et al.*, 2005), permite a formação no estuário do rio Cassiporé do fenômeno conhecido como pororoca (Santos *et al.*, 2004).

Na linha de costa, a modelagem da paisagem é fortemente controlada pelas ondas litorâneas que se propagam do quadrante E, tomando direcionamento para W (Allison *et al.*, 2000), com período dominante de 6-7 segundos e altura média de 1,5 metros (Mendes, 1994).

5.3. MATERIAIS E MÉTODOS

5.3.1. Dados de sensores remotos utilizados

Para o reconhecimento e mapeamento dos diferentes ambientes costeiros dos cabos Cassiporé e Orange, foram utilizados quatro produtos distintos oriundos de sensores remotos óptico e nas microondas (**Tabela 5.1**).

Tabela 5.1: Características dos dados de sensoriamento remoto utilizados.

Sensor/ Plataforma	Data de Aquisição	Angulo de incidência	Resolução espacial (m)	Bandas Espectrais	Fonte dos dados
RADARSAT Wide 1	08/01/2003	20°- 31°	35,5 x 27,0	C (5,6 cm)	RSI/MDA ⁽¹⁾
SAR/JERS-1	Maio de 1996	34°- 43°	90	L (23,5 cm)	GRFM ⁽²⁾
ETM/Landsat 7	11/09/2000	nadir	28,5	Todas	GLCF/Maryland ⁽³⁾
Modelo Digital de Elevação (SRTM)	Fevereiro de 2000	--	90	C (3,1 cm)	NASA ⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Radarsat Internacional; ⁽²⁾ Projeto Global Rain Forest Mapping (GRFM); ⁽³⁾ Global Land Cover Facility, Universidade de Maryland; ⁽⁴⁾ National Aeronautics and Space Administration.

5.3.2. Processamento digital das imagens de sensores remotos

5.3.2.1. Processamento da imagem Landsat ETM 7

A presença de aerossóis, moléculas e vapor d'água assim como, de diferentes gases que constituem as camadas atmosféricas modificam a propagação do espectro elétrico magnético e por conseguinte alteram a reflectância de alvos terrestres num sistema de sensor remoto óptico, causando atenuação na resposta espectral das imagens (Chavez Jr., 1988). Para minimizar tais efeitos, as imagens Landsat utilizadas, inicialmente, passaram por correções atmosféricas segundo o método de subtração do *pixel* escuro proposto por Chavez Jr. (1988).

Para composições de bandas espectrais no espaço de cores RGB, análises estatísticas foram empregadas a fim de que se pudesse estabelecer Optimum Index Factor (OIF), proposto por Chavez Jr. *et al.* (1982). Para a imagem utilizada, o melhor conjunto de bandas para composição colorida no espaço de cores RGB, segundo os índices IOF, é obtido pelas bandas ETM1, ETM4 e ETM5 (**Tabela 5.2**).

Tabela 5.2 : Cinco mais altos valores dos índices OIF calculados para as 6 bandas espectrais do sensor ETM/Landsat.

Rank	Combinação	OIF
1	145	68,43
2	134	62,64
3	345	59,67
4	124	56,29
5	234	52,50

A imagem Landsat não foi georreferenciada, uma vez que, esta já estava ortorretificada (Tucker *et al.*, 2004). Estes dados apresentam tamanho de pixel igual a 28,5m, tendo controle horizontal a partir de 6 a 12 pontos identificados por cena e precisão posicional absoluta com erro quadrático médio inferior a 50 metros, sendo corrigidos geometricamente pelo método da ortorretificação (Tucker *et al.*, 2004).

Visando melhorar a qualidade visual e aumentar o contraste entre os alvos imageados, a imagem Landsat foi realçada através de técnicas de realce linear e por principais componentes-PCA.

Pela técnica de realce linear foram manipulados os histogramas da imagem, com ampliação do intervalo dinâmico da cena sem, no entanto, ocorrerem modificações na simetria do histograma (Novo, 1992). Por sua vez, a extração da componente principal de uma ou mais bandas espectrais, constitui-se numa transformação estatística na qual a informação redundante da banda é estratificada a fim de formar "nova banda espectral" (Chavez & Anderson, 1991). A PC1, ou Primeira Componente deste processo agregou grande parte dos dados comuns das bandas envolvidas, ou seja, a maior variância. As demais componentes tiveram os dados mais particularizados da cena. A soma da variância total das componentes é igual a variância total da imagem original (Chavez & Anderson, 1991).

Os resultados da análise por principais componentes (**Tabela 5.3**) demonstram que os três primeiros alto-canais (PC1, PC2 e PC3) concentram cerca de 99% de toda informação espectral contida na cena.

Tabela 5.3 : Variância (%) das 6 componentes principais do sensor ETM/Landsat

Componente	Variância (%)
PC1	61,2
PC2	33,9
PC3	3,9
PC4	0,7
PC5	0,2
PC6	0,1
TOTAL	100

5.3.2.2. Processamento da imagem RADARSAT Wide-1

Imagens de radar apresentam constantemente distorções radiométricas causadas pelo padrão de radiação da antena e pelo ruído *speckle* (Raney, 1998). Na imagem, o ruído torna sua aparência granular (mudanças bruscas de níveis de cinza de um *pixel* para outro), dificultando a identificação e classificação de tons, formas e texturas nos alvos (Dutra *et al.*, 2003). Para redução do efeito *speckle*, utilizaram-se técnicas de filtragem digital através do modelo convolucional linear proposto por Frost *et al.* (1982), com janela 3x3.

Na etapa de correção geométrica, a imagem Radarsat-1 passou pelo processo de ortorretificação (Toutin, 1995) a partir da coleta de 17 pontos de controle extraídos da imagem Landsat ortorretificada, da leitura dos dados de efemérides do sensor SAR, bem como com a utilização do DEM produzido pela missão SRTM. Neste processo obteve-se erro (RMS) igual a 1,72 *pixel*, o que corresponde a 21,5 metros, sendo definida a projeção cartográfica geográfica e o elipsóide WGS 84 como referência.

5.3.2.3. Processamento da imagem JERS-1

O mosaico original produzido pelo Projeto Global Rain Forest Mapping (GRFM), com cobertura igual a 5° de latitude por 5° de longitude do Estado do Amapá, obtido no período chuvoso foi recortado no trecho que corresponde a área de trabalho e logo após, passou pelo processo de correção geométrica através do modelo polinomial de primeira ordem. Esta imagem foi registrada a partir da cena do Sistema Landsat ETM 7, sendo este procedimento adotado a fim de que se pudesse manter as características originais da geometria da imagem óptica. O registro foi realizado com a aquisição de 34 pontos de controle, obtendo-se erro (RMS) menor que um *pixel* (< 90m), com reamostragem pelo método do vizinho mais próximo. Neste processo também ficou definida a projeção cartográfica geográfica e o elipsóide WGS 84 como referência.

5.3.2.4. Processamento dos dados SRTM

O processamento das imagens SRTM correspondeu a produção de um mosaico de imagens para área de interesse. Posteriormente, eliminaram-se os ruídos existentes na interface que representa os corpos d'água através da criação de uma "máscara" que passou a representar esta superfície.

5.3.3. Levantamento de campo

Para caracterização da área de estudo e validação das informações extraídas dos produtos de sensoriamento remoto, trabalhos de campo foram realizados durante o período de 17 a 25 de setembro de 2005 (período de estiagem). O reconhecimento "*in loco*" da área de

estudo proporcionou a identificação das formas e ambientes costeiros bem como suas distribuições espaciais, validando informações extraídas da interpretação dos produtos de sensores remotos ou mesmo, inserindo novos dados que não puderam ser obtidos na análise digital.

Na avaliação, as unidades e sub-unidades geomorfológicas presentes na paisagem e suas tipologias vegetais visualmente dominantes foram espacializadas e analisadas de maneira integrada. Aspectos geológicos relacionados com a granulometria do sedimento e processo dominante na linha de costa (deposição, erosão e transporte) foram, também, objeto de análise. Esta etapa contou, ainda, com um sobrevôo, realizado no período chuvoso, visando o reconhecimento de áreas de difícil acesso.

5.3.4. Mapeamento das formas e ambientes costeiros

As informações extraídas a partir dos dados de sensores remotos e das informações de campos foram inseridas, organizadas e manipuladas em um banco de dados georreferenciado. O mapeamento das formas e ambientes costeiros seguiu a proposta do ITC (*International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences*) para levantamentos geomorfológicos sintéticos (Verstappen & Van Zuidam, 1991), apresentando os mapas geomorfológicos, como produto de estudos ambientais vinculados à relação da forma do relevo e aos fatores que condicionam a paisagem, tais como: clima, litologia, solos, hidrologia e vegetação.

5.4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir dos diferentes produtos de sensores remotos avaliados, da interpretação visual da resposta espectral inerentes as propriedades físico-químicas presentes na imagem óptica e da análise visual das formas, tons e texturas existentes nas imagens de radar, foram reconhecidos e mapeados oito ambientes costeiros, os quais estão agrupados em três Unidades Morfológicas (**Tabela 5.4**).

Tabela 5.4: Unidades Morfológicas, sub-unidades e ambientes costeiros mapeados na área investigada.

Unidades Morfológicas	Sub-unidades / Ambientes costeiros	
Planalto Costeiro		
Planície Costeira	Planície de Maré	Campos alagáveis de supramaré
		Manguezais de intermaré
		Planície de Lama (<i>tidal mudflats</i>)
Planície Aluvial	Pântanos de Água Doce	<i>Fresh Marsh</i>
		<i>Fresh Swamp</i>
	L a g o s	
	Canal Fluvial	Depósitos de barra fluvial
Planície de inundação fluvial		

5.4.1. Reconhecimento das unidades morfológicas e ambientes costeiros

O Planalto, a Planície Costeira e Planície Aluvial representam as três grandes unidades morfológicas presentes na área investigada. O Planalto e o tabuleiro costeiro são constituídos por duas formações geológicas distintas: a) terrenos de idade proterozóica (Escudo das Guianas), formados por granodioritos, trondhjemitos, tonalitos e tipos gnaissificados de idêntica composição (Avelar, 2002) e; b) depósitos neógenos (Grupo Barreiras), caracterizados por sedimentos do tipo arenito fino e grosso, siltito e argilito com lentes de conglomerado e arenito grosso (CPRM, 2004).

A planície costeira engloba os sedimentos quaternários lamosos de origem marinha e flúvio-estuarina, depositados em ambiente de maré, pântanos de água doce, sistemas fluviais e lagos. Por sua vez, a planície aluvial agrega os sedimentos de origem fluvial depositados na margem de canal, em ambiente de barras fluviais e planície de inundação fluvial.

A partir de dados de sensores remotos ópticos e nas microondas foram compartimentados na área de estudo as unidades Planalto, Planície Costeira e Planície Aluvial, bem como identificados os ambientes e sub-unidades vinculados a estes. Os domínios geomorfológicos e ambientes reconhecidos são descritos a seguir.

5.4.1.1. Planalto costeiro

Representam elevados afloramentos do Escudo das Guianas de idade Paleoproterozóica (2,05-2,13 Ga) (Avelar, 2002) e depósitos neógenos (Formação Barreiras), manifestados na paisagem através de um relevo com suaves ondulações, cujas cotas topográficas variam em média de 30 a 200 metros, podendo atingir, em alguns casos, até 300 metros de altura (**Figura 5.2**).

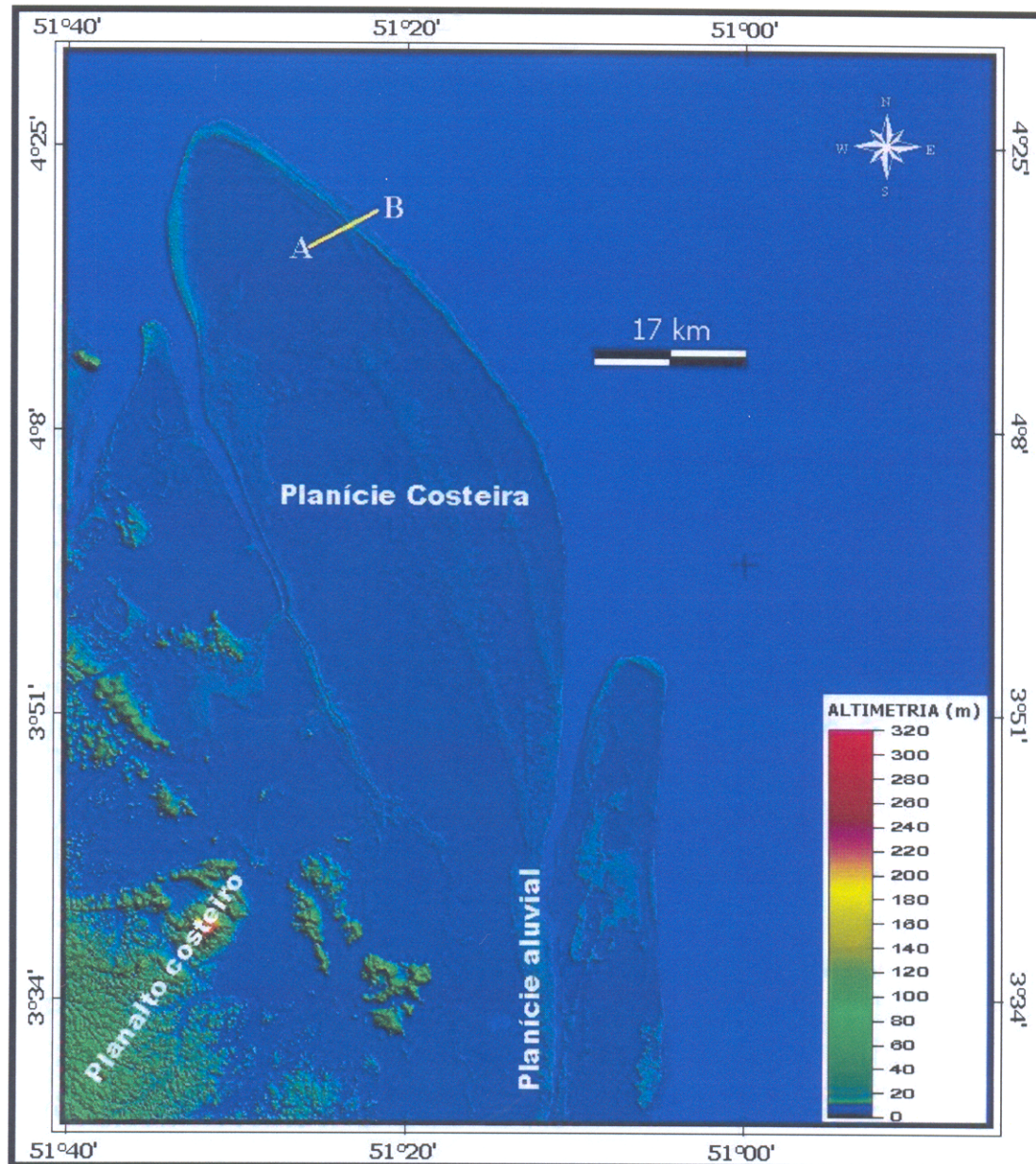


Figura 5.2 - Visão geral da área de estudo a partir do modelo digital de elevação SRTM. A-B representa a localização do perfil topográfico constante da **Figura 5.8**.

Na área de estudo, o planalto costeiro ocupa posição espacial orientada de N para S, sendo recoberto por vegetação densa de terra firme, tipicamente encontrada em toda região amazônica, proporcionando na imagem do sistema Landsat ETM 7 alta reflectância na faixa do infra-vermelho próximo e médio (**Figura 5.3A**). Nas imagens de radar, a distinção entre esta unidade e a planície é bem caracterizada devido a mudança abrupta na altimetria do terreno (macro-topografia), que causa um aumento em sua rugosidade (**Figura 5.3B**). Outro mecanismo que permite a distinção entre o planalto e planície costeira diz respeito ao ter de umidade concentrado nestes dois ambientes. Essencialmente, na imagem RADARSAT-1 o planalto aparece em tons mais escuros que a planície (**Figura 5.3C**), considerando que esta, encontram-se em sua maior porção, alagada na época em que foi feita a aquisição da imagem.

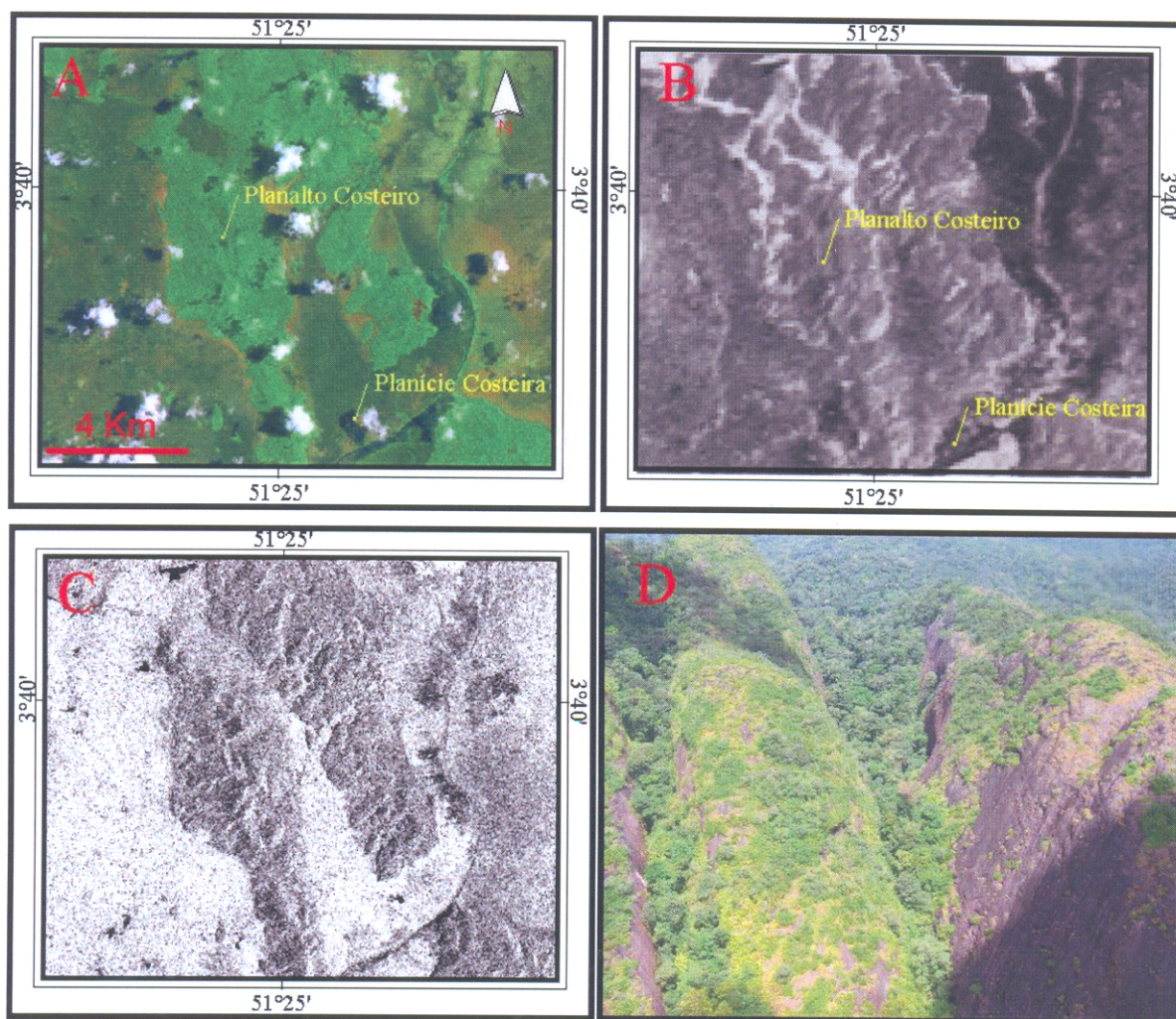


Figura 5.3 – Padrões de resposta espectral do Planalto Costeiro: A – imagem Landsat ETM (composição 5R4G3B); B – Imagem JERS-1; C – Imagem RADARSAT-1; D – fotografia tomada em sobrevôo.

A transição da planície para o planalto acontece de forma abrupta, não sendo possível observar a existências de falésias ou escarpas nesta interface, sendo apenas percebida devido a mudança na cobertura vegetal. No contato, os campos arbustivos, herbáceos e de vegetação de pequeno porte das várzeas dão espaço para a floresta densa de terra firma que recobre o planalto.

5.4.1.2. Planície costeira

Corresponde aos terrenos quaternários holocênicos, situados em extensas áreas que atingem até a 5 m de altitude. Apresenta largura variável de 30 a 50 Km, orientada no sentido norte-sul, sendo limitada a oeste com o planalto costeiro e a leste com o Oceano Atlântico.

A partir dos diferentes padrões de reflectância e retroespalhamento observado nas imagens de sensores remotos bem como, das observações de campo, na planície costeira foi reconhecida o ambiente de planície de maré, o qual é representado pelas sub-unidades: planície lamosa de supramaré, representada pelos campos alagáveis de supramaré e planície lamosa de intermaré (manguezais de intermaré e planície de lama "tidal mudflat").

5.4.1.2.1. Planície Lamosa de Supramaré

Representam extensas áreas planas de deposição lamosa, protegidas da ação das ondas, situadas no interior da planície lamosa de intermaré, com cotas topográficas inferiores a 5 metros, as quais são vegetadas por enormes campos arbustivos encontrados em todo o cabo Orange, sendo totalmente inundadas no período chuvoso e, parcialmente, nas marés de sizígia.

Os campos alagáveis de supramaré que ocorrem em todo o interior do cabo Orange, formam extensas faixas com largura média de 15-20Km, onde os sedimentos quaternários foram depositados e colonizados por espécies de vegetação arbustiva e herbácea, e em menor quantidade, por buritis (*Mauritia flexuosa Mart*) e Aninga (*Montrichardia arborescens*) (**Figura 5.4**)



Figura 5.4 - Campos alagáveis de supramaré recobertos por vegetação do tipo gramíneas (interior do cabo Orange). Ao fundo, observa-se o contato com o manguezal costeiro (Foto realizada em período chuvoso).

No período de janeiro a junho, o regime é controlado pela pluviosidade, sendo secundária a influência das marés. Após este período, a redução das chuvas permite maior penetração das marés, tornando salobra a água superficial.

O reconhecimento deste ambiente na imagem Landsat acontece devido a mistura espectral das respostas do solo alagadiço e da vegetação tipo gramíneas, que proporcionam cores marrom claro na imagem (**Figura 5.5b**). Nas imagens SAR Radarsat-1, os campos alagáveis de supramaré são observados em tons de cinza claro, considerando o estado de alagamento destes ambientes no período chuvoso, que provoca aumento no sinal retroespalhado (**Figura 5.6b**). No mosaico JERS-1, a vegetação de gramíneas aparece em tons de cinza escuro, em virtude do baixo retorno do sinal, ocasionado pela pequena rugosidade da vegetação quando comparada com o comprimento de onda do sensor (23,5 cm), o qual gera um espalhamento quase-especular (**Figura 5.7b**).

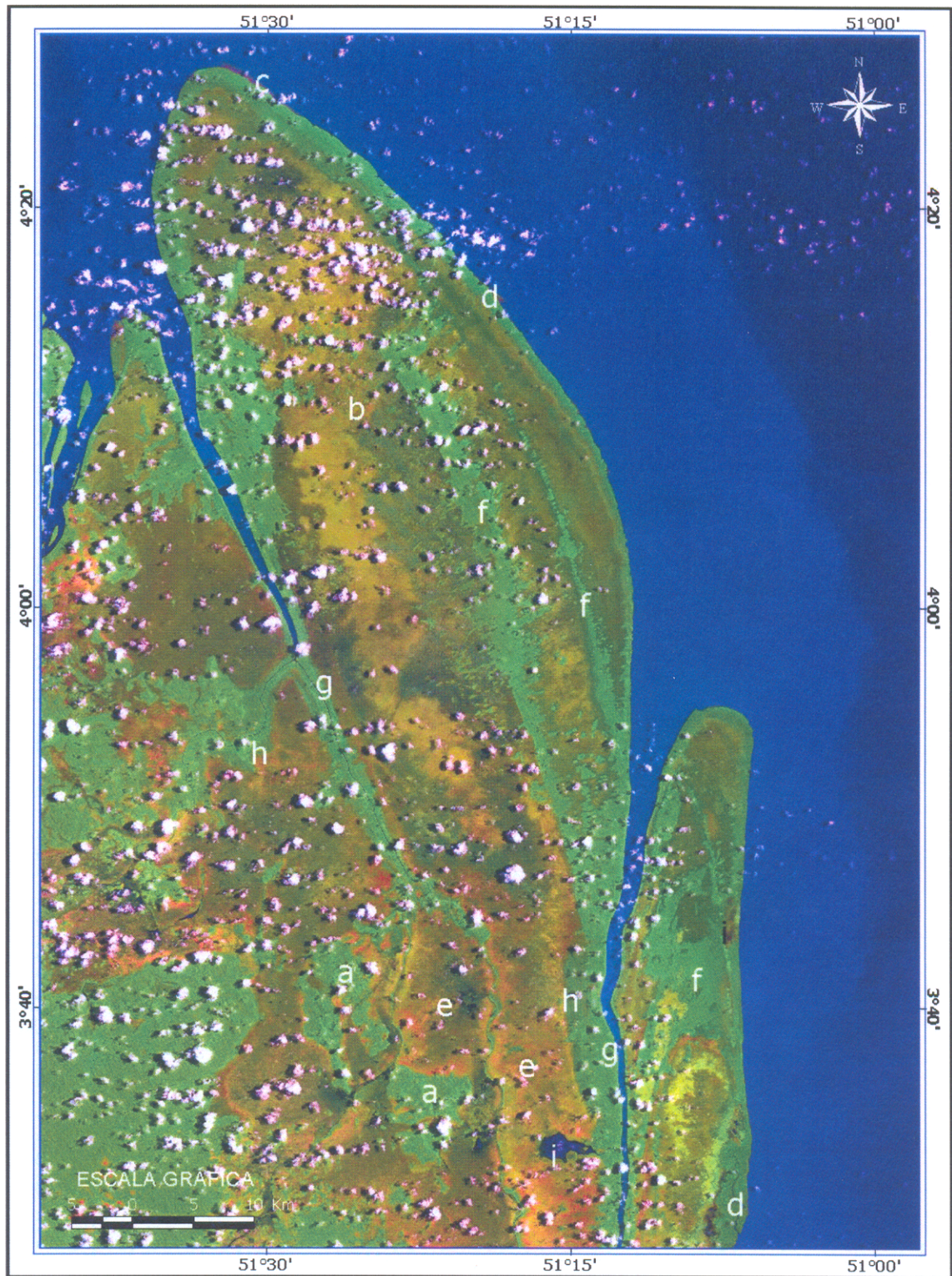


Figura 5.5- Imagem Landsat ETM 7 (composição 5R4G1B). Observar as unidades morfológicas: Planalto (a), Planície Costeira (b,c,d), Planície Aluvial (e,f,g,h,i). As feições e ambientes discriminados são: (b) planície lamosa de supramaré (campos alagáveis); (c) planície lamosa de intermaré (planície de lama); (d) manguezais de intermaré; (e) pântanos de água doce (fresh water marsh); (f) fresh water Swamp; (g) barra fluvial; (h) planície de inundação fluvial e (i) lagos.

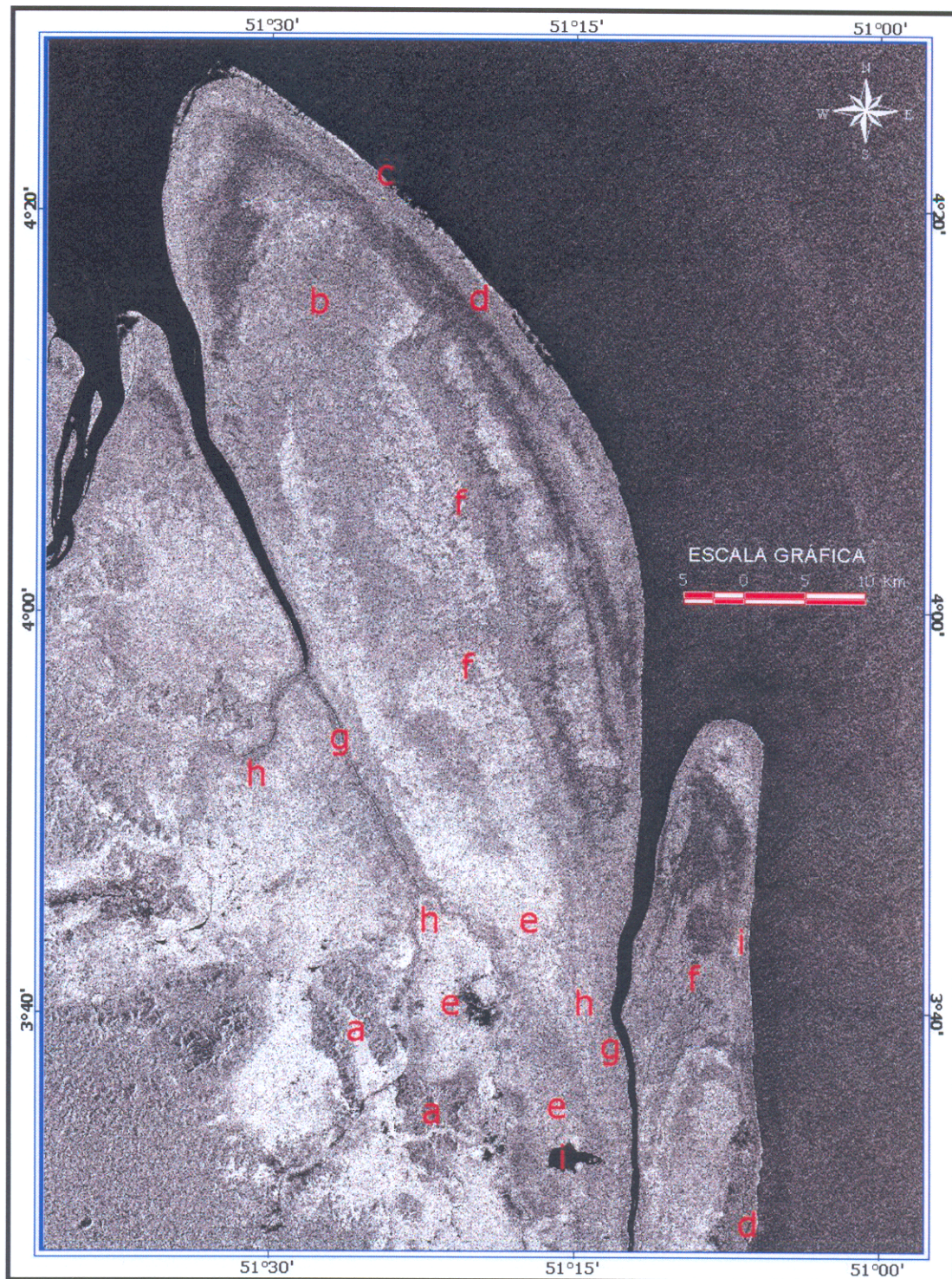


Figura 5.6- Imagem RADARSAT-1. Observar as unidades morfológicas: Planalto (a), Planície Costeira (b,c,d), Planície Aluvial (e,f,g,h,i). As feições e ambientes discriminados são: (b) planície lamosa de supramaré (campos alagáveis); (c) planície lamosa de intermaré (planície de lama); (d) manguezais de intermaré; (e) pântanos de água doce (fresh water marsh); (f) fresh water Swamp; (g) barra fluvial; (h) planície de inundação fluvial e (i) lagos.

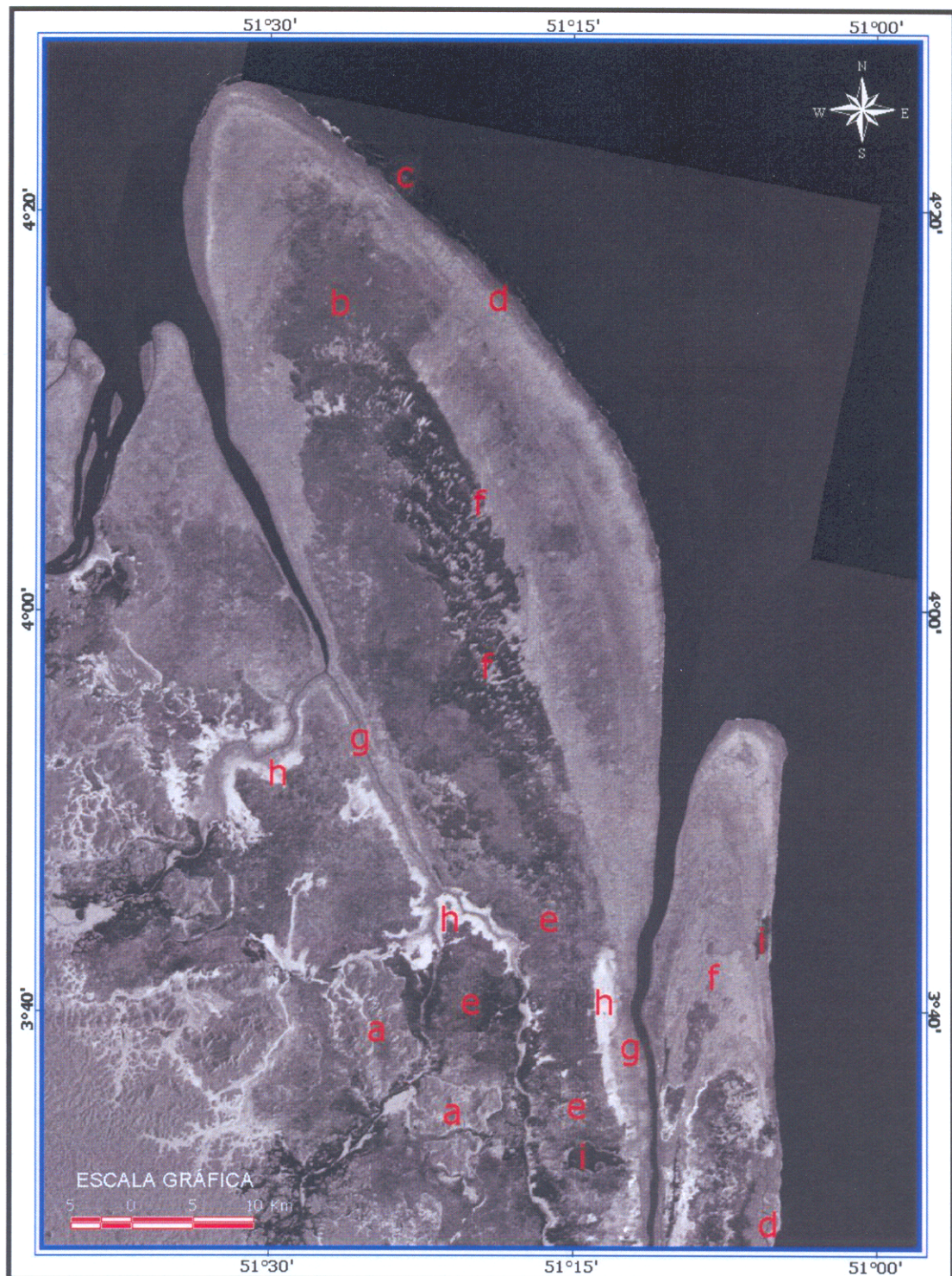


Figura 5.7- Imagem JERS-1. Observar as unidades morfológicas: Planalto (a), Planície Costeira (b,c,d), Planície Aluvial (e,f,g,h,i). As feições e ambientes discriminados são: (b) planície lamosa de supramaré (campos alagáveis); (c) planície lamosa de intermaré (planície de lama); (d) manguezais de intermaré; (e) pântanos de água doce (fresh water marsh); (f) fresh water Swamp; (g) barra fluvial; (h) planície de inundação fluvial e (i) lagos.

No produto SRTM, que é sensível a variação de topografia da vegetação, o reconhecimento desta unidade é possível devido o desnível existente entre o dossel do mangue costeiro e da vegetação dos campos alagáveis (gramíneas) (**Figura 5.8**).

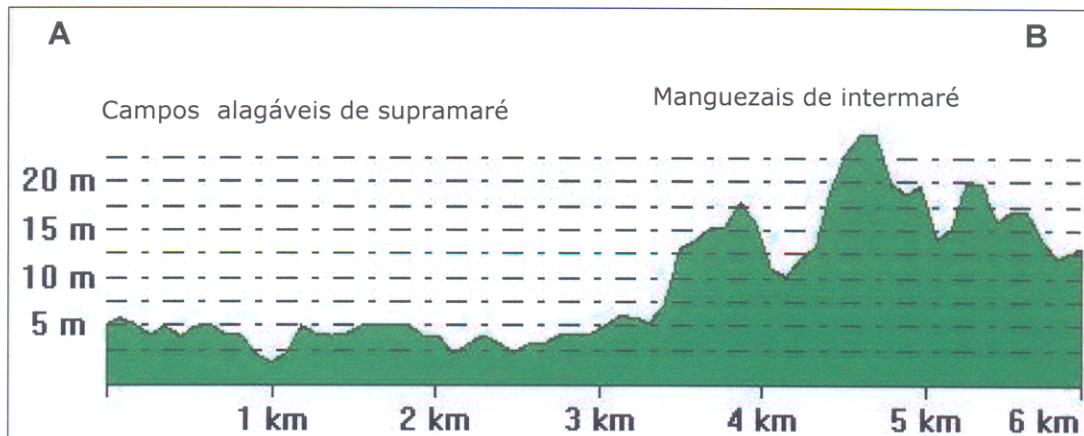


Figura 5.8- Perfil topográfico da planície costeira (cabo Orange), no trecho em que ocorre o contato entre os manguezais de intermaré e os campos alagáveis de supramaré a partir do modelo digital de elevação SRTM. Observar a localização do perfil na **Figura 5.2**.

5.4.1.2.2. Planície Lamosa de intermaré:

A presença de uma ampla planície de maré lamosa desenvolvida a partir de ambiente marinho e flúvio-marinho, sob influencia diária de inundações pela ação das marés e ondas caracteriza toda linha de costa que se estende, na área de estudo, desde o cabo Cassiporé até o extremo norte do cabo Orange.

A planície lamosa de intermaré é constituída pela planície de lama e manguezais costeiros. Esta região funciona como área propensa a acumulação de sedimentos lamosos (silte e argila), depositados na linha de costa pela ação das ondas solitárias e correntes de maré em taxas de sedimentação superiores a 2 cm/ano (Allison, 1993).

Segundo Allison *et al.* (1995a), os estratos lamosos das planícies de intermarés (tidal mudflats), apresentam disposição paralela à linha de costa, com largura variável de 2 a 5 Km após a franja de manguezal, sendo a acumulação de sedimentos recente (entre 500 – 1300 anos), em trechos da linha de costa onde a profundidade média atinge de 4 a 6 metros.

O reconhecimento deste sub-ambiente com o uso de sensores remotos orbitais depende das condições de marés para trechos onde não existe a vegetação (mangue), devido sua

susceptibilidade as inundações das marés, ocasionada por seu posicionamento geográfico e por sua baixa topografia.

Na imagem JERS-1, a planície de lama (não vegetada) apresenta retroespalhamento especular com textura lisa (**Figura 5.7c**) em função do comprimento de onda do sensor (23 cm). Na composição ETM (Landsat), o elevado conteúdo de partículas de sedimentos em suspensão nas águas costeiras, quase sempre superior a 300mg/L^{-1} (Froidefonde *et al.*, 2004), associado com sua movimentação pela ação das ondas que atingem a zona de acreção lamosa, proporcionam alta reflectância em suas bandas espectrais na região do visível (**Figura 5.9c**).

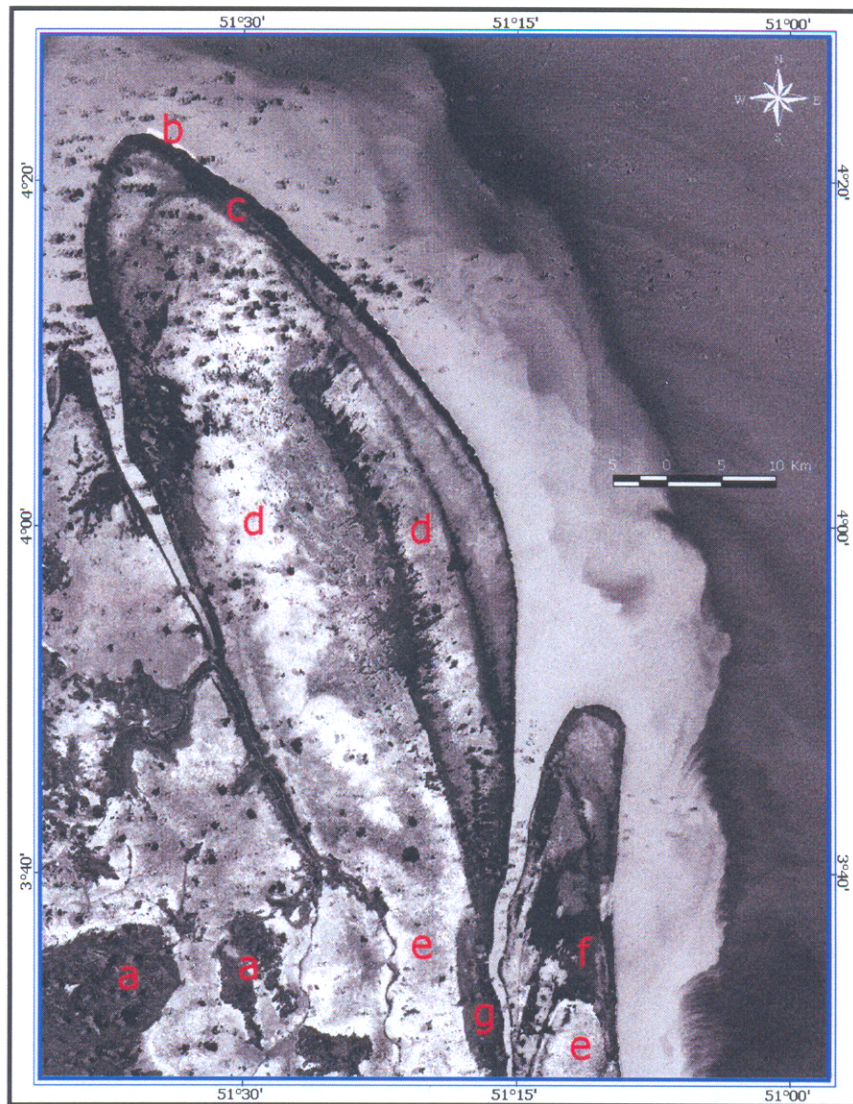


Figura 5.9 - Segunda componente (CP2) obtida a partir da análise de componentes principais das bandas ETM (2000): 1,2,3,4,5 e 7. Observar as unidades morfológicas: Planalto (a), Planície Costeira (b,c,d), Planície Aluvial (e,f,g). As feições e ambientes discriminados são: (b) planície lamosa de supramaré (campos alagáveis); (c) planície lamosa de intermaré (planície de lama); (d) manguezais de intermaré; (e) pântanos de água doce (fresh water marsh); (f) fresh water Swamp; (g) barra fluvial.

A planície lamosa costeira apresenta gradiente baixo até a isóbata de 5 metros, variando de 1:2000 no cabo Cassiporé, até 1:3200, ao longo do flanco do cabo Orange, sendo recortadas, ocasionalmente, por canais de marés (*tidal creeks*) pouco profundos (<0,5m), orientados perpendicularmente à linha de costa.

No cabo Orange ocorrem as maiores taxas de progradação costeira por sedimentos depositados em ambiente de intermaré em taxas de acumulação que variam de 0,24 a 2,0 cm/ano ou 0,16-1,3 g/cm²/ano (Allison *et al.*, 1995a). A presença da vegetação de mangue recentemente instalada na porção frontal e lateral do cabo lamoso reforça a idéia da rápida evolução geológica sedimentar pela qual este ambiente vem passando. Isto porque, o mangue jovem representado pelas espécies de *Spartina* e *Avicennia*, ajuda a reter e a manter junto ao continente o substrato lamoso transportado e depositado pelas marés e ondas na planície de lama (*tidal mudflats*). Neste sentido, o sistema manguezal representa no continente o registro geológico de uma das etapas do processo de sedimentação e progradação da planície em nível de intermaré.

Os depósitos de manguezais são constituídos por sedimentos argilosiltosos, plásticos e inconsistentes, ricos em matéria orgânica, desenvolvidos em áreas muito baixas, onde as cotas topográficas variam de 0 a 2 metros. As espécies *Rhizophora harrisonia*, *Rhizophora mangue* e *Avicennia germinans* (siriúba) predominam em ambiente de intermaré, ajudando a reter os sedimentos, reduzindo o efeito das correntes de maré e da erosão costeira.

Na área de estudo, o sistema de manguezal costeiro é por vezes recortado por inúmeros canais de maré, que servem de conduto para a entrada e saída das marés, sendo inundado duas vezes ao dia (maré semidiurna; **Figura 5.10**).

No extremo norte, os manguezais de intermaré estendem-se em toda parte frontal e lateral do cabo Orange, apresentando formato linguóide (em forma de arcos) e peninsular, com larguras que variam de 1 a 3 Km, encontrando-se em franco desenvolvimento em direção a plataforma interna. São limitados internamente pelos campos alagáveis de supramaré e externamente pelos bancos lamosos costeiros.



Figura 5.10- Contato entre os manguezais costeiros e a *tidal mudflat* na linha de costa do cabo Orange. (foto obtida em condição de baixa-mar).

Na porção sul, ou seja, junto ao cabo Cassiporé, os manguezais costeiros são "atacados" pelas ondas que chegam ao litoral, criando uma extensa e larga faixa de mangues erodidos que dão forma denteada a linha de costa (**Figura 5.11**). Neste local, os manguezais estendem-se longitudinalmente, com larguras que variam de 1 a 2 Km nas porções onde existe o contato entre o continente e o Oceano Atlântico. Em menores extensões (com largura inferior a 200 metros), colonizam a foz do Rio Cassiporé, onde são encontradas espécies jovens de *Avicennia*.



Figura 5.11- Manguezal em erosão no costa do cabo Cassiporé (Ponta do Marrecal).

A distinção entre o manguezal de intermaré, a planície lamosa de supramaré (campos alagáveis) e os pântanos de água doce é, por muitas vezes, difícil de ser percebida na imagem RADARSAT-1 W1 (**Figura 5.6.d.e**), devido a similaridade nos mecanismos de retroespalhamento para estes ambientes, considerando que na banda "C" a interação entre a energia eletromagnética e o alvo acontece a nível de dossel. Ademais, é fato que, em imagens de radar, o conteúdo de umidade no alvo aumenta seu retroespalhamento e, tendo em vista as características da área de estudo, em especial, sua susceptibilidade a alagamentos pela ação das chuvas e das marés, tais fatores contribuem para o alto coeficiente de retroespalhamento percebido na imagem RADARSAT.

Neste sentido, para o entendimento deste comportamento, foram analisadas as condições ambientais relacionadas com a influência de maré e das chuvas no momento da aquisição da imagem de radar.

Para área de estudo, a altura da maré no momento da aquisição da imagem SAR era de aproximadamente 2,2 metros (**Figura 5.12**), refletindo condição de maré enchente em regime de sizígia (lua cheia), segundo previsões geradas pelo DHN (Departamento Nacional de Hidrografia e Navegação).

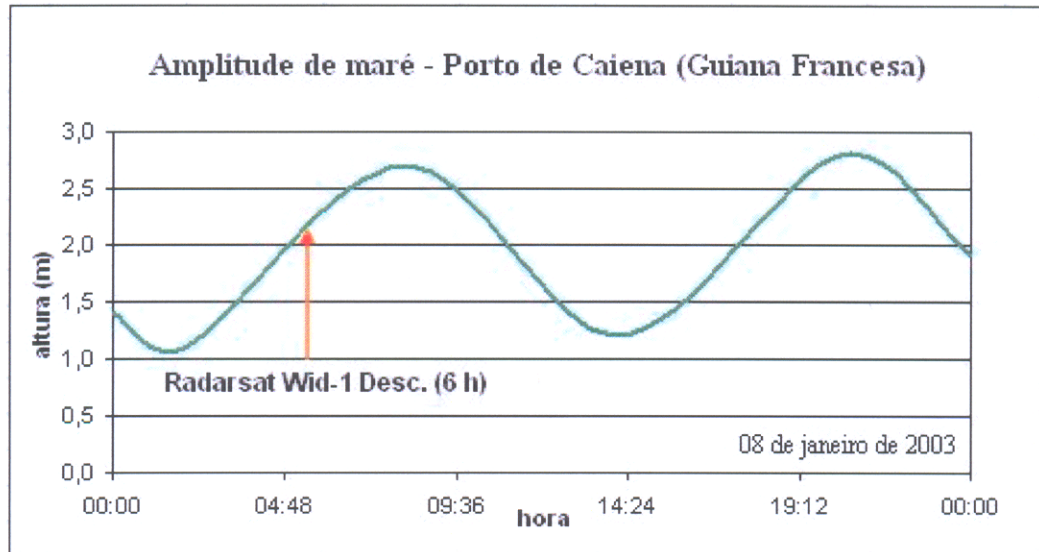


Figura 5.12- Previsão de amplitude das marés para o dia 08/01/2003. Fonte: DHN (2004)

No que diz respeito às taxas de precipitação pluviais para região dos cabos Cassiporé e Orange, infelizmente não se dispõem destes dados para o período de aquisição da imagem, sendo somente possível presumir que no mês de janeiro (época de aquisição da imagem), as chuvas são geralmente constantes na Costa Norte Amapaense (**Figura 5.13**).

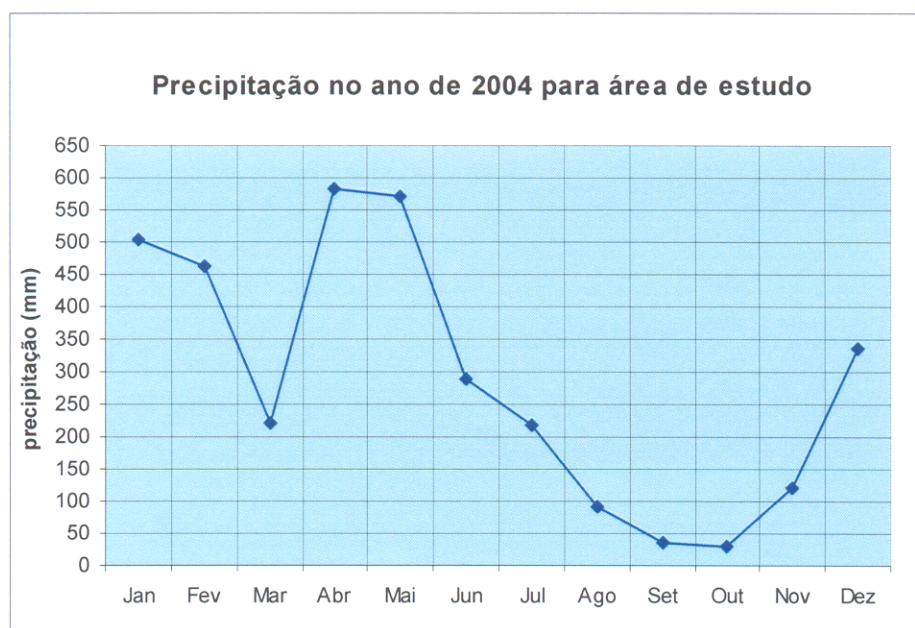


Figura 5.13- Precipitação no ano de 2004 para área de estudo. Fonte: CPTEC (2006).

A partir destas informações, é possível especular que as condições de maré possivelmente influenciaram nos mecanismos de retroespalhamento dos ambientes costeiros, especialmente, na planície lamosa de supramaré, que em função de sua baixa topografia (< 5m) e cobertura vegetal (campos de gramíneas) é alagada pelas marés de sizígia.

Deste modo, o mapeamento destas regiões somente com a utilização da imagem RADARSAT esbarrou em sérias limitações. De forma contrária, o uso do produto Landsat através da extração da principal componente (PCA) e dos dados de elevação SRTM adicionaram importante contribuição para o mapeamento do manguezal.

Na imagem Landsat, os manguezais apresentam alta reflectância na banda 4, sendo que na área de estudo, o produto equivalente a principal componente diferenciou de maneira clara os limites entre o mangue e a vegetação de gramínea em virtude do conteúdo de umidade e do controle geobotânico, que é refletido pela estrutura da vegetação (**Figura 5.9.c.d**).

De modo complementar, as imagens interferométricas SRTM contribuíram com dados de altimetria, delimitando com precisão os limites entre o mangue e os campos alagáveis de supramaré, considerando a sensibilidade do sensor a altura das árvores (**Figura 5.8**).

5.4.1.3. Planície aluvial:

A ação de variação das marés semidiurnas e das chuvas, reproduzem nas margens dos cursos d'água, mecanismos de deposição e erosão fluvial, associados com o desenvolvimento da vegetação de várzea.

Na área de estudo, a planície aluvial encontra-se associada com os pântanos de água doce, lagos e depósitos de margem de canal evidenciados nos rios Cassiporé, Uaçá e Urucaúá através dos ambientes de canal fluvial e planície de inundação.

5.4.1.3.1. Pântanos de água doce:

Na área de estudo este ambiente foi reconhecido sobre duas formas: *freshwater marsh* (pântanos com gramíneas) e *freshwater swamp* (pântanos com arbustos). Em ambos, representam ambientes saturados, podendo ser influenciados por cursos fluviais que deságuam na planície costeira, sendo a influência da maré salina desprezível. Em trechos muito rebaixados, os pântanos represam as águas das chuvas, funcionando como verdadeiros lagos durante o

período chuvoso. Nos demais casos, são inundados apenas no período de janeiro a junho, quando as águas pluviais juntam-se ao fluxo aquoso resultante do transbordamento dos canais de maré.

Nos ambientes saturados, onde ocorre o desenvolvimento de vegetação de pequeno porte, tais como: gramíneas, ervas, juncos, entre outros, utilizou-se a nomenclatura "*Fresh water Marsh*", conforme o proposto por Davis Jr. (1983) e Mitsch & Gosselink (1994). Estes ambientes ocorrem extensivamente no interior do cabo Cassiporé e na porção sul do cabo Orange, sendo caracterizado com áreas planas, de baixa topografia (entre 3 e 5 metros), susceptíveis a alagamentos, especialmente no período chuvoso.

Silveira (1998) define o padrão de desenvolvimento dos pântanos de água doce no interior do cabo Cassiporé como estando relacionado com o estágio evolutivo do cabo lamoso no contexto da planície costeira norte amapaense, ou seja, diretamente vinculado ao sistema de progradação costeira por sedimentos amazônicos. Segundo a autora, as linhas acrecionárias existentes em seu interior foram formadas em mais de um momento progradacional e seu crescimento aconteceu nas porções frontais e laterais do cabo Cassiporé (**Figura 5.14**). Os eventos P1, P2, P3 e P4 foram datados pela autora, respectivamente, em 5.030 ± 45 , 4.450 ± 30 , 3.530 ± 30 e 2.790 ± 3 .

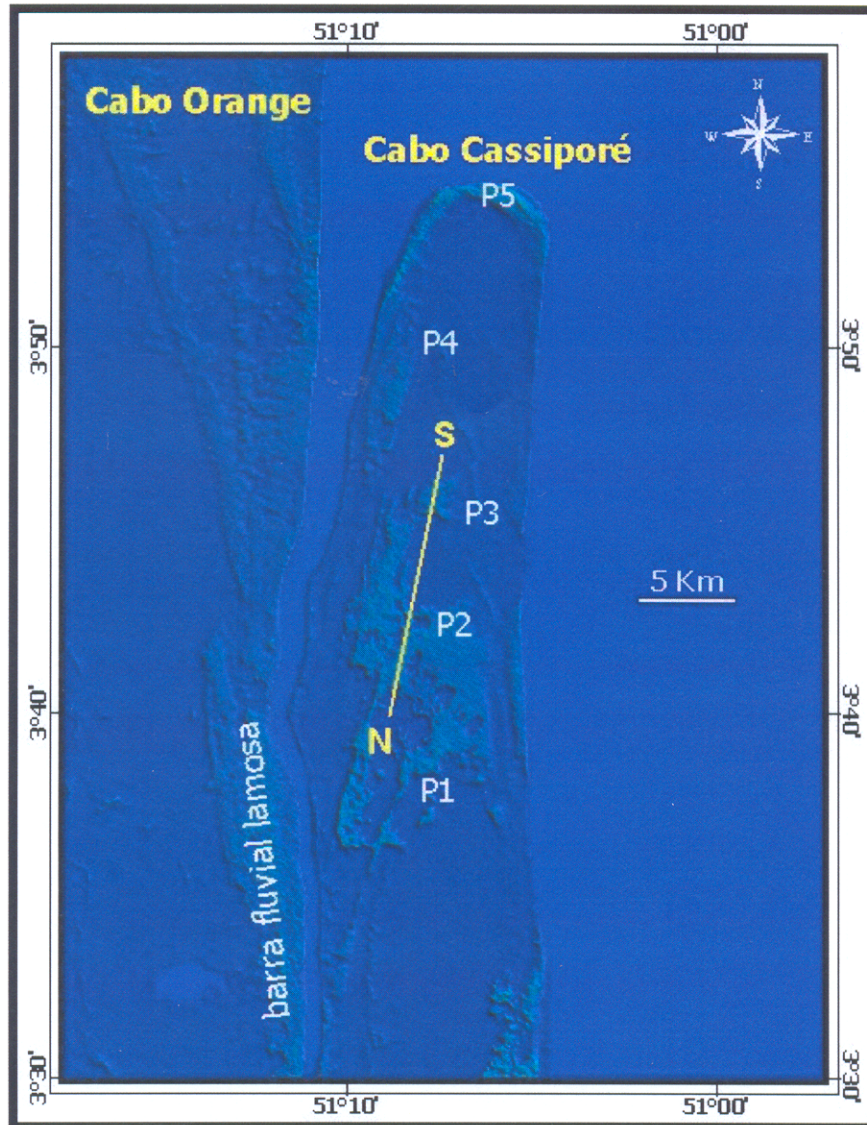


Figura 5.14- Evolução da planície costeira no trecho que compreende o cabo Cassiporé (fonte: imagem interferométrica SRTM). N-S representa a localização do perfil topográfico constante da **Figura 5.15**.

Em todos os produtos de sensores remotos, a umidade do solo e a tipologia vegetal controlam a resposta espectral dos ambientes pantanosos. As imagens RADARSAT e JERS-1, por serem tomadas no período de maior ocorrência das chuvas, apresentam-se em tons claro, devido a alta constante dielétrica causada pela presença da água associada com as gramíneas (**Figura 5.6; 5.7**).

Por sua vez, no produto SRTM, a zonação existente entre os campos de gramíneas e a vegetação de grande porte (várzeas) permite separar através da altimetria os ambientes *Fresh water Marsh* e *Fresh water Swamp* (**Figura 5.15**).

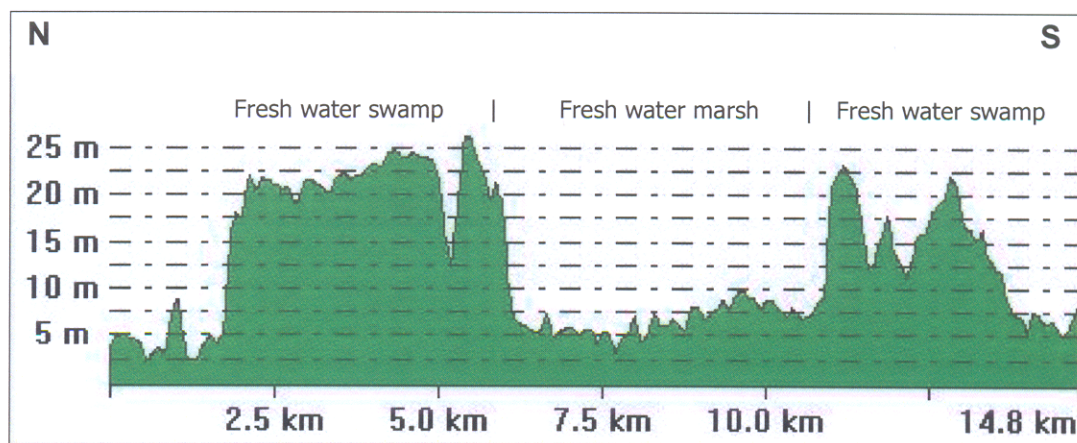


Figura 5.15- Perfil topográfico da planície costeira (cabo Cassiporé), no trecho em que ocorre o contato entre a vegetação de várzea (*Fresh water swamp*) e os campos inundáveis ou campos de várzea (*Fresh water marsh*) a partir do modelo digital de elevação SRTM. Observar a localização do perfil na **Figura 5.16**

O ambiente "*Fresh water Swamp*", por sua vez, apresenta característica similar com pântanos de água doce tipo "*marsh*" no que diz respeito à localização, extensão e origem geológica. Entretanto, morfologicamente encontram-se em nível topográfico mais elevado que aqueles (cerca de 1m acima). Portanto, são menos propensos a alagamentos e ao represamento de água das chuvas, além de apresentarem cobertura vegetal dominada pela presença de floresta de várzea densa, na qual ocorrem as espécies de anani (*Symphonia globulifera*), genipapo (*Genipa americana*), samauma (*Ceiba pentandra*), mututi (*Pterocarpus amazonicus*) entre outras (**Figura 5.16**).



Figura 5.16 – Pântanos de água doce recobertos por vegetação do tipo arbustiva (*freshwater swamp*) observados no interior do cabo Cassiporé. Fonte gentilmente cedida pela Dra. Odete Fátima M. Silveira.

Na porção norte do cabo Orange foi reconhecido *fresh water swamp* na forma de duas linhas acrecionárias, com largura de 500 a 2000 metros, dispostas em sentido oeste para leste, formando arcos que são colonizados por vegetação de várzea (**Figura 5.5f**). Estas faixas são relíquias de sedimentos depositados em sistema de marés, servindo como testemunhas de antigas posições da linha de costa, não estando na fase atual sujeitas a inundações por marés e mais expostas a insolação.

Na imagem Landsat ETM 7, o reconhecimento desta unidade é possível devido a alta reflectância que a vegetação de várzea proporciona em comprimentos de ondas no infravermelho próximo e médio, tornando sua aparência em tom verde claro (**Figura 5.5f**). No produto RADARSAT W1, o retroespalhamento acontece a nível superficial de dossel, não sendo verificado a presença do mecanismo *double bounce*, provavelmente devido a limitação do comprimento de onda utilizado (banda C) e do arranjo ou estrutura da copa de vegetação (**Figura 5.6f**).

5.4.1.3.2. Lagos

São corpos hídricos existentes em áreas rebaixadas (depressões) da planície costeira, com cotas topográficas quase ao nível do mar, os quais são alimentados por água doce

proveniente das chuvas e do lençol freático. Destaca-se na área o Lago Maruani, um corpo hídrico de água doce interligado com os Rios Cassiporé e Uaçá, com área total de aproximadamente 7,4 Km² (**Figura 5.17**).



Figura 5.17- Em primeiro plano o Lago Maruani e ao fundo os pântanos de água doce.

Segundo Guerra & Guerra (2003), os lagos da costa do Amapá representam depressões ainda não entulhadas, situados em ambiente flúvio-marinho, originados pela disposição de sedimentos carreados pelos tributários diretos do Atlântico, ou seja, pelos enormes rios que deságuam no Oceano Atlântico. Este processo aconteceu quando do afogamento generalizado da costa amapaense com a evolução da Transgressão Flandriana, a cerca de 6000 anos BP (Mendes, 1994).

Nas imagens de radar (RADARSAT-1, JERS-1 e SRTM), os lagos apresentam-se em tons negros, em resposta ao mecanismo de espalhamento especular que predomina nestes ambientes (**Figura 5.6i - 5.7i**). Do mesmo modo, na imagem do sensor óptico Landsat, os corpos d'água absorvem a radiação eletromagnética, reduzindo a reflectância, aparecendo em tons de cinza escuro (**Figura 5.5i**).

5.4.1.3.3. Canal fluvial

Sistemas depositados em margem de canal em forma de barras, influenciados pelas marés, descargas fluviais e de sedimentos foram observados nas margens dos principais cursos dos rios Cassiporé e Uaçá.

Estes locais são recobertos por vegetação de várzea, que está sujeita à inundação, interconectadas de forma permanente ou temporária aos cursos de água, irregularmente distribuídas ao longo da drenagem, com topografia plana a suavemente ondulada. O desenvolvimento de florestas de várzea somente acontece em áreas de água não-salina, em trechos de baixa declividade, onde o material dissolvido e em suspensão, de origem terrígena   transportado e depositado pela a o das marés.

As barras laterais desenvolvidas às margens das drenagens junto às bordas do canal, em área protegida da corrente, possuem forma alongada em sentido lateral e longitudinal, depositadas desde o dique marginal (*levee*) até a planície de inunda o na forma espalhada, sendo recobertas por vegeta o de várzea (**Figura 5.18**).



Figura 5.18 - Barra lamosa fluvial recoberta por vegeta o de várzea as margens do rio Cassiporé.

As maiores barras laterais encontram-se na margem do rio Cassiporé, chegando a atingir 800 m de largura e 15Km de comprimento, encontrando-se geomorfologicamente, em média, de 2 m acima do nível da água.

5.4.1.3.4. Planície de inundação fluvial

Equivalem as áreas planas e baixas, onde são depositados os sedimentos finos oriundos de transbordamento dos meandros ativos e abandonados durante os períodos de grandes cheias.

Na área de estudo, a planície de inundação possui orientação paralela aos rios Cassiporé e Uaçá, possuindo largura variável de 100 a 900 metros, estando associada com os pântanos de água doce, depósitos de barra fluvial, planície lamosa de intermaré e com o planalto costeiro.

Para o reconhecimento da planície de inundação foram investigados os mecanismos de espalhamento SAR em regiões de floresta. De maneira geral, a floresta tropical reflete um brilho médio que se observa na maioria das imagens produzidas por sensores SAR, considerando que as árvores espalham de forma difusa. No entanto, se a imagem é realmente brilhante, então isto geralmente indica que se estão sendo obtidas medidas de duplo espalhamento, ou seja, de *double bounce*.

No caso das imagens obtidas pelo sensor JERS-1, os mecanismos de *bouble bounce*, acontecem freqüentemente em regiões de florestas inundadas devido a característica do comprimento de onda do sensor SAR em banda L (23,5cm). Assim, a vegetação alagada, tais como as regiões de várzeas amazônicas, apresentam nestas imagens uma forte assinatura espectral, ou seja, grande quantidade de energia retroespalhada que ocorre em função dos múltiplos espalhamentos entre a superfície da água e os componentes da floresta (Hess *et al.*, 2003).

Na área de estudo, a presença de duplas reflexões nas margens dos rios Uaçá, Cassiporé e seus afluentes possibilitaram o mapeamento da planície de inundação fluvial com grande habilidade (**Figura 5.19**).

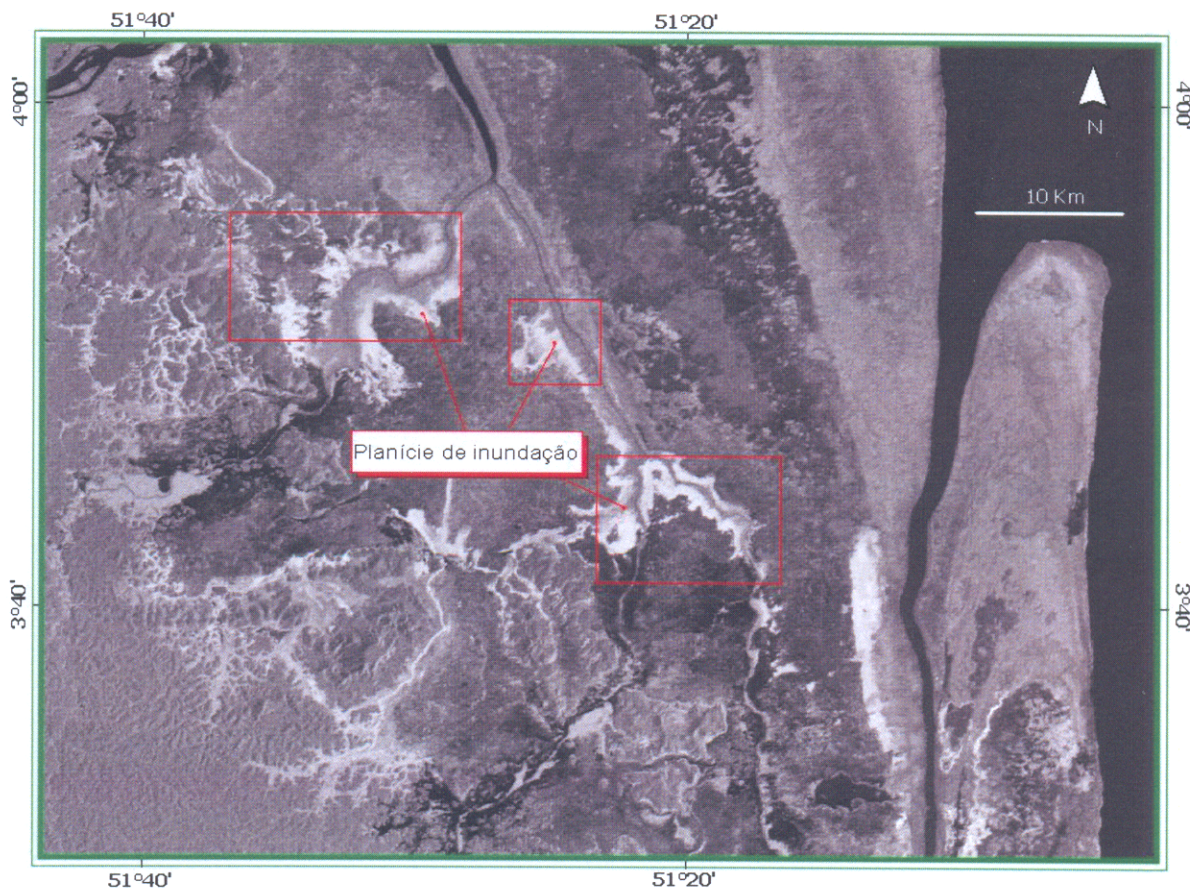


Figura 5.19 -reconhecimento da planície de inundação fluvial a partir do mecanismo de *double bounce* na imagem JERS-1 (imagem tomada no período chuvoso)

5.4.2. Mapeamento dos ambientes costeiros

A partir do reconhecimento dos ambientes costeiros, as imagens de sensores remotos foram agrupadas e organizadas em uma base de dados georreferenciadas no software ArcView 3.3, onde os polígonos referentes a cada ambiente foram vetorizados permitindo a visualização da distribuição espacial, no mapa de ambientes costeiros que pode ser visto na **Figura 5.20**.

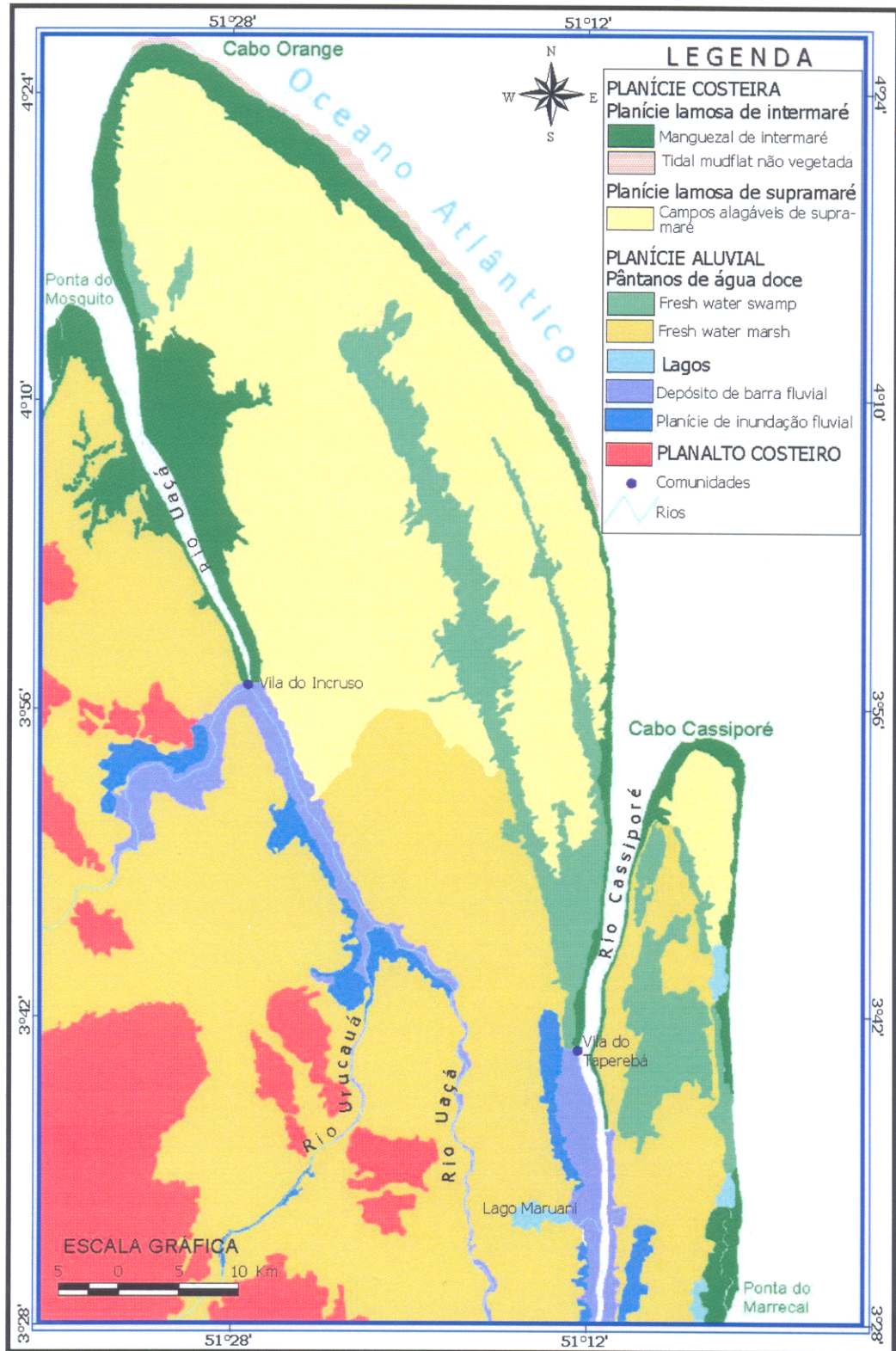


Figura 5.20 - Mapa das unidades geomorfológicas, feições e ambientes costeiros dos cabos Orange e Cassiporé, produzido a partir das imagens de sensores remotos e de observações de campo.

5.5. CONCLUSÕES

Os ambientes e feições observados e mapeados na planície costeira norte amapaense resultam de complexas interações climáticas, oceanográficas, hidrodinâmicas e geomorfológicas, relacionadas com as flutuações do nível do mar ocorridas durante o Holoceno e nas variações das enormes descargas hídricas e de sedimentos lamosos oriundas do rio Amazonas (Silveira, 1998).

Considerando sua localização geográfica, adjacente a foz do rio Amazonas e em ambiente tropical, o setor norte da planície costeira amapaense experimenta desde 6000 anos B.P. (Mendes, 1994) processos geomorfológicos dominados por marés, correntes de marés e ondas que depositam em ambiente de inframaré, intermaré e, em menor proporção, em supramaré, sedimentos amazônicos por dezenas de quilômetros em sentido longitudinal, permitindo o desenvolvimento de manguezais e a formação de extensos pântanos costeiros.

Os sedimentos de fina granulometria essencialmente constituídos por silte e argila, associados com fatores hidrodinâmicos, proporcionaram a formação de cabos lamosos que progradam em ritmo acelerado (dezenas de metros por ano) em direção ao Oceano Atlântico. Os cabos Cassiporé e Orange, são os registros geológicos fiéis de um ambiente deposicional influenciado pelo Sistema de Dispersão Amazônico atuante na plataforma continental amapaense. Por sua vez, seus ambientes internos, compostos por pântanos de água doce, campos alagáveis influenciados por marés, lagos e manguezais são típicos ambientes flúvio-estuarinos e/ou flúvio-marinhos desenvolvidos em terrenos muito baixos (< 5m), inundados na maior parte do ano, formados em ambiente eminentemente deposicional.

O reconhecimento dos domínios geomorfológicos planalto costeiro, planície costeira e planície aluvial bem como, dos diferentes ambientes e feições presentes nos cabos lamosos Cassiporé e Orange, no extremo norte do Amapá através do uso de dados de sensores remotos orbitais ópticos e nas microondas demonstra o potencial desta tecnologia em regiões costeiras tropicais sujeitas a severas condições de alagamentos.

Apesar das características climáticas desfavoráveis devido a presença de nuvens, as imagens ópticas do sensor ETM Landsat, reconheceram e diferenciaram, em diferentes faixas do espectro eletromagnético (visível, infravermelho próximo e médio), variáveis e condicionantes naturais, tais como: composição e estrutura da vegetação, níveis de alagamento (ter de

umidade), processos geomorfológicos atuantes, característicos da atual planície costeira norte amapaense.

Por sua vez, o emprego de dados SAR (Radar de abertura sintética), mostra-se, recentemente, como uma enorme potencialidade em regiões tropicais, como é caso da zona costeira amazônica, tendo em vista sua capacidade de imageamentos em condições climáticas adversas. No caso desta pesquisa, as imagens Radarsat-W1 e JERS-1, adquiridas no período chuvoso amapaense (entre janeiro e maio), apresentaram dados orbitais, até então, inexistentes em sensores ópticos, sobre condições naturais de alagamentos por chuvas em um trecho da planície costeira do Estado do Amapá. Isto porque, geralmente, somente se consegue aproveitar imagens ópticas adquiridas no período de estiagem que vai de agosto a dezembro.

A análise dos mecanismos de retroespalhamento (de dossel, volumétrico e *double bounce*), presentes em imagens SAR forneceu dados ligados com a micro, macro topografia e constante dielétrica dos alvos, delimitando estruturais geológicas com grande habilidade. Nos produtos Radarsat-w1 através da percepção da variação de constante dielétrica e rugosidade superficial foram mapeados os domínios geomorfológicos planalto e planície costeira.

De modo complementar, os mecanismos de duplas reflexões (*bouble bounce*) evidenciados na imagem JERS-1 do período chuvoso, permitiu espacializar e quantificar a real extensão da planície de inundação fluvial formada as margens dos rios Uaçá, Urucaúá, Cassiporé e afluentes. Por fim, os dados de elevação da missão SRTM determinaram as variações topográficas em nível de dossel da vegetação dos ambientes, trazendo uma visão do terreno em 3D e reduzindo a subjetividade de interpretação no processo de mapeamento.

É importante enfatizar que as informações produzidas por sensores remotos são controladas e afetadas por variáveis ambientais, tais como: chuvas, bruma, fumaça, incidência solar, marés, etc., e sua interpretação, deste modo, necessitará do conhecimento e validação de campo a fim de serem reduzidos os erros e a subjetividade no processo de produção de mapas ou mesmo na geração de informações.

CAPÍTULO 6

MUDANÇAS MORFOLÓGICAS NA LINHA DE COSTA AO LONGO DOS CABOS CASSIPORÉ E ORANGE ATRAVÉS DA ANÁLISE MULTI-TEMPORAL DE IMAGENS DE SENSORES REMOTOS.

RESUMO

A região costeira, compreendida pelos cabos lamosos Cassiporé e Orange constitui um ambiente dinâmico influenciado pelo rio Amazonas, onde as modificações na linha de costa estão vinculadas a severos processos de sedimentação e erosão. Imagens de diferentes sensores remotos ópticos e nas microondas, coletadas no período de 1980 a 2003, quando inseridas num banco de dados geográfico (SIG), permitiram a identificação e quantificação, a partir da vegetação de mangue, da distribuição espacial das zonas de progradação e retrogradação costeira. Durante o período, as maiores taxas de erosão ocorreram junto ao cabo Cassiporé, onde em média 27,5 metros de distância linear e 1,37 Km² por ano do sistema de manguezal foi erodido. Por outro lado, os maiores índices de deposição de sedimentos ocorreram no cabo Orange, onde a planície costeira prograda em direção ao Oceano Atlântico em taxas de acumulação linear de 24,6m ao ano e agregou ao longo de vinte e três anos uma área de 55,85 Km² de manguezal ao longo da linha de costa. Os mecanismos de progradação determinaram um acréscimo na vegetação de manguezal de 50,8% ao longo das três últimas décadas. Um balanço sedimentar realizado, demonstrou que na área pesquisada predominam os processos construtivos (61,3%) sob os processos erosivos (38,7%), o que sugere que a partir do cabo Orange se formam os depósitos modernos responsáveis pelo desenvolvimento dos bancos de lama do Amazonas que migram em direção à costa das Guianas.

PALAVRAS-CHAVES: sensoriamento remoto, linha de costa, erosão costeira, sedimentação, manguezal, Amapá.

6.1. INTRODUÇÃO

A gestão e o uso adequado da zona costeira implica necessariamente no conhecimento dos processos que atuam sobre ela, dentro de uma escala temporal ampla. O estudo da evolução dos litorais, normalmente, pode ser feito a partir de duas escalas temporais distintas: uma de longo prazo, que envolve ciclos de milhares a dezenas de anos, onde os processos de

modelagem da costa estão associados às variações climáticas, e outra, de curto prazo (escala de meses ou anos), onde estão envolvidos os processos dinâmicos que controlam a evolução da paisagem na atualidade (Forbes & Liverman, 1996).

Nesta última escala, as mudanças podem ocorrer devido a padrões cíclicos de frequência e intensidade de tempestades, de alternância entre períodos chuvosos e secos, de direção e intensidade dos ventos, de regime de ondas e marés, de transporte sedimentar e de balanço local de sedimentos (Nordstrom, 1980), desencadeando processos de erosão, transporte e sedimentação costeira. Por sua vez, a resposta do litoral aos agentes hidrodinâmicos depende da configuração e orientação da costa, dos tipos de materiais que constituem os substratos costeiros, da vegetação e do rearranjo da bacia fluvial adjacente (Souza Filho & Paradella 2002; França & Souza Filho, 2003).

Em estudos de monitoramento, o ideal é que se possam contemplar as duas escalas temporais, a fim de projetar através dos processos atuais as tendências ou o comportamento da costa (erosão, sedimentação, reativação de cursos fluviais) em um cenário futuro de evolução costeira.

Neste contexto, o sensoriamento remoto desponta como uma importante ferramenta para estudos multi-temporais, especialmente, em ambientes costeiros dinâmicos, onde as alterações atingem extensas escalas espaciais e se processam com relativa rapidez, como é o caso da costa amapaense. Nesta região, os processos sedimentares atuantes na linha de costa são amplamente controlados pela elevada dinâmica sedimentar e hídrica do Rio Amazonas (Allison *et al.*, 2000).

O Amazonas despeja um volume médio de água de 6,3 trilhões m³/ano, o que corresponde a aproximadamente 16% de toda a água doce descarregada nos oceanos (Oltman, 1968) e uma descarga de sedimentos estimada em $1,2 \times 10^8$ ton/ano (Meade *et al.*, 1985). Do total de sólidos lançados anualmente no Oceano Atlântico, de 10-15% atinge o litoral amapaense e a Guiana Francesa na forma de planícies de maré lamosas (Allison *et al.*, 1995b). Estas planícies funcionam como verdadeiros depósitos de lamas amazônicas e são ocupadas, em grandes extensões, por florestas de manguezais (Schaeffer-Novelli *et al.*, 2000).

A colonização dos mangues junto ao litoral é interpretada, freqüentemente, como sinal da estabilidade do sedimento na planície de maré lamosa (Lefebvre *et al.*, 2004). De forma contrária, quando as ondas costeiras "atacam" o litoral amapaense, os sedimentos da planície

de intermaré são removidos e a vegetação de manguezal, desprotegida, passa a ser dominada pela erosão (Allison & Lee, 2004).

Manguezais são, portanto, importantes geoindicadores de mudanças geomorfológicas, sedimentares e oceanográficas em ambientes costeiros tropicais (Souza Filho *et al.*, 2006), pois podem atuar como medidas de processos e fenômenos geológicos que ocorrem em superfície, em escala temporal de até cem anos, fornecendo informações significativas para uma avaliação ambiental (Berger, 1996).

Nesta pesquisa o geoindicador da linha de costa estabelecido foi o correspondente a vegetação de mangue, que permanece invariável independente da condição de maré. Este indicador foi definido em virtude de sua capacidade para mensurar e avaliar processos e formas costeiras, considerando que a vegetação de manguezal constitui um dos melhores ambientes para análise espacial de ambientes costeiros a partir de sensores remotos (Souza Filho & Paradella, 2003, Souza Filho *et al.*, 2006).

A ferramenta do sensoriamento remoto associado com trabalhos de campo permite inferir sobre vários dos processos assinalados, uma vez que, em imagens de sensores remotos, o manguezal apresenta alta reflectividade no infra-vermelho próximo (Souza Filho & Paradella, 2001), sendo possível identificá-lo em planícies de maré. De forma similar, em imagens SAR, este tipo de vegetação apresenta retroespalhamento devido as variações em sua altura, na geometria de seu dossel e no conteúdo de umidade, gerado pela influência das chuvas e inundação por marés (Proisy *et al.*, 2000, Gonçalves, 2005; Trebossen *et al.*, 2005).

Por sua vez, os SIG's têm sido largamente utilizados como suporte para análise espacial e modelagem de fenômenos, especialmente, no monitoramento de processos costeiros. Nestes estudos, os bancos de dados georreferenciados podem registrar, mapear e quantificar com precisão, diferentes posições de processos erosivos e acrecionários em planícies costeiras (França & Souza Filho, 2003), expressando essas variáveis em distâncias lineares, taxas e percentagens (Gowda *et al.*, 1995; Faure, 2001).

Neste capítulo são apresentadas metodologias de processamento e interpretação de imagens de sensores remotos para estudos de monitoramento costeiro, visando a quantificação de alterações ocorridas em linha de costa, em médio e curto período, mediante o uso de técnicas de sistemas de informações geográficas (SIG's). Na abordagem, o movimento da linha de costa forneceu um registro da direção das mudanças relacionadas ao recuo e avanço da linha

de costa, determinando os trechos onde a erosão e a acumulação de sedimentos vêm acontecendo.

6.2. ÁREA DE ESTUDO

A área investigada está localizada a 400 Km da foz do Rio Amazonas, entre as latitudes 3° e 5° Norte e 51° e 52° de Longitude Oeste, sendo representada pelos cabos lamosos Cassiporé e Orange (**Figura 6.1**).

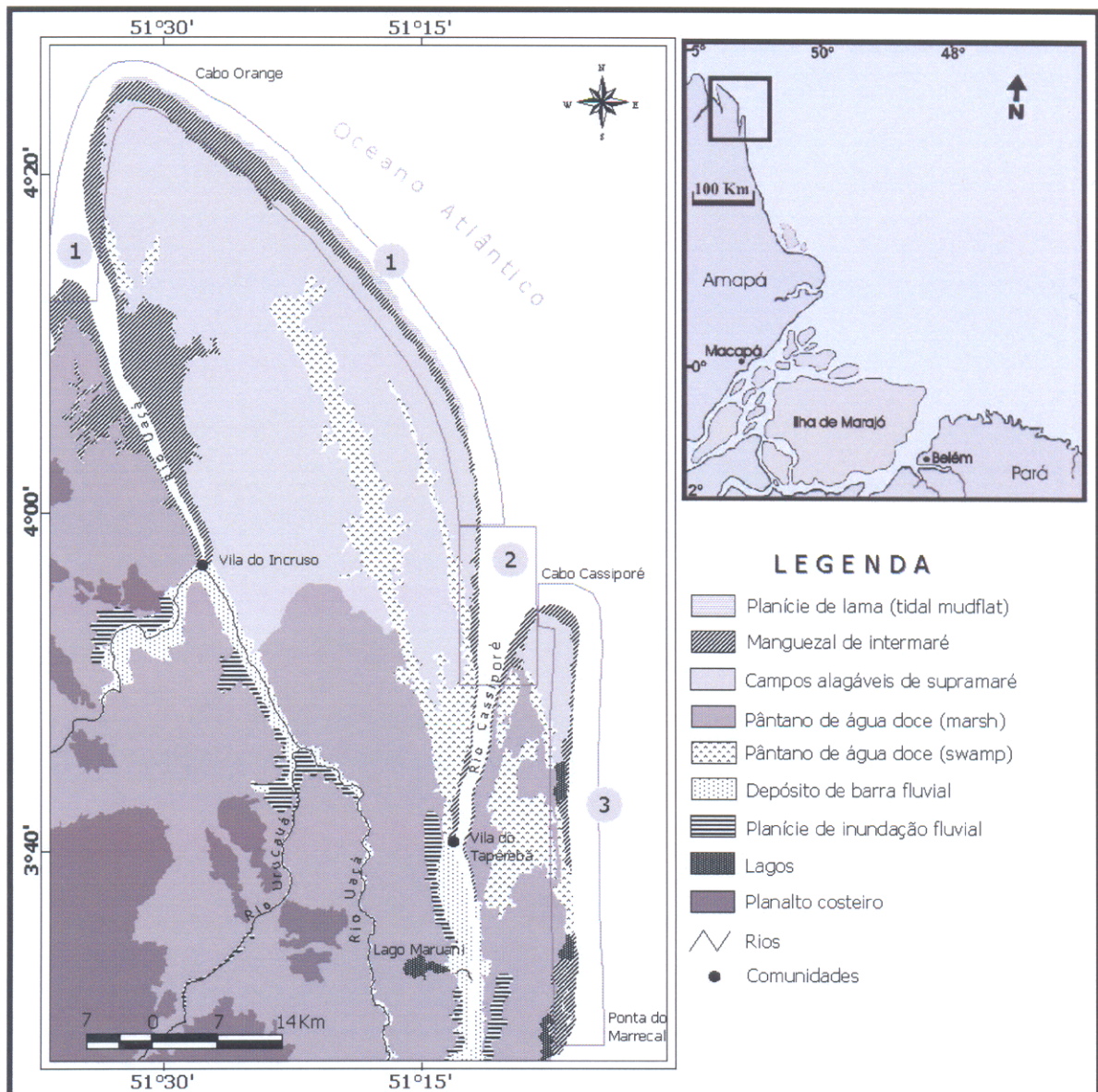


Figura 6.1 – Localização da área de estudo, mostrando distribuição dos ambientes e feições costeiras do local. Na linha de costa, os números representam a setorização da área visando o monitoramento de sua evolução.

O embasamento regional do planalto costeiro é formado por rochas do Escudo Pré-cambriano das Guianas, constituídos por granodioritos, trondhjemitos, tonalitos e tipos gnaissificados de idêntica composição (Lima *et al.*, 1991; Avelar, 2002). Em menores proporções estão os depósitos Neógenos plio-plestocênicos (Grupo Barreiras), caracterizados por sedimentos do tipo arenito fino e grosso, siltito e argilito com lentes de conglomerado e arenito grosso (CPRM, 2004), manifestados na paisagem através de um relevo com suaves ondulações, cujas cotas topográficas variam de 30 a 200 metros.

A zona costeira dos cabos Cassiporé e Orange, no norte do Estado do Amapá, engloba os sedimentos holocênicos de origem marinha e flúvio-estuarina. Nessa faixa litorânea, as altitudes geralmente estão situadas ao nível médio das marés, sofrendo constantes modificações geomorfológicas, erosionais ou deposicionais, causadas principalmente por processos hidrodinâmicos das marés, correntes de marés e ondas.

A área está inserida em uma costa aberta dominada por mesomarés (amplitudes de 2-3 metros; DHN, 2004), compartimentada em dois domínios geomorfológicos: (1) Planície costeira, composta pelos ambientes de planícies lamosas de intermaré e supramaré, e (2) planície aluvial, formada por pântanos de água doce, lagos, depósito em barra fluvial e planície de inundação fluvial (**figura 6.1**).

O tipo de circulação oceânica estabelecido próximo à plataforma continental interna da região de estudo é predominantemente dirigido para noroeste, em função da Corrente Costeira Norte Brasileira (CCNB), cuja velocidade de fluxo é superior a 1m/s (Beardsley *et al.*, 1995). Os ventos alísios de sudeste, paralelos ao litoral, mudam de direção durante os meses de janeiro a março, quando passam a soprar com maior intensidade de nordeste, portanto perpendicularmente ao litoral (Fontes, 2000). As ondas geradas por estes ventos são maiores que aquelas induzidas pelos alísios de sudeste e, em vez de estimular a erosão, trazem sedimentos finos da plataforma em direção à costa, na forma de bancos de lama fluidas submersos (Nittrouer *et al.*, 1995)

O clima é do tipo Am, segundo Köppen com temperatura média anual de 27°, umidade relativa do ar de 82% e precipitação pluvial anual superior a 3.000mm (ANA, 2004), com as chuvas distribuídas de dezembro a julho.

A vegetação da planície costeira na região é caracterizada pela ocorrência de campos herbáceos, arbustivos, vegetação de várzea e mangues. A vegetação de campo predomina nos pântanos de água doce, sendo constituída por espécies das famílias Poaceae, Cyperaceae,

Nymphaeaceae, Alismataceae, Onagraceae e Lentibulariaceae (IEPA/IBAMA, 2003). Nas várzeas, ocorrem espécies compostas por *Astrocaryum mumbaca* (mumbaca), *Didymopanax morototoni* (torototó), *Cecropia sp.* (embaúba), *Euterpe oleracea* (açai), *Macrolobium acaciaefolium* (arapari), *Mauritia flexuosa* (buriti), *Guadua sp.* (taboca) (IEPA/IBAMA, 2003). Para a vegetação de mangue os gêneros dominantes são *Rhizophora harrisonia*, *R. mangle*, *Avicennia gerrinans* e *Laguncularia racemosa* (Herz, 1991). No planalto, predomina a floresta ombrófila de terra firma, característica de toda região amazônica.

6.3. MATERIAIS, TÉCNICAS E PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para constituir as séries temporais utilizadas nesta análise multi-temporal, foi selecionado um conjunto composto por três imagens ópticas dos sensores MSS, TM e ETM-7 do Sistema Landsat e três imagens SAR (radar de abertura sintética) dos sistemas RADARSAT-1, JERS-1 e missão SRTM, todas com data de geração entre os anos de 1980 a 2003. Ver detalhes na

Tabela 6.1.

Tabela 6.1: Características dos dados de sensoriamento remoto utilizados.

Sensor/ Plataforma	Data de Aquisição	Angulo de incidência	Resolução espacial (m)	Swath (km)	Bandas Espectrais
MSS/Landsat 2	15/08/1980	nadir	79 x 79	185	5, 6,7
TM/Landsat 4	16/10/1992	nadir	30 x 30	185	3,4,5
SAR/JERS-1	Maio/1996	34°- 43°	90 x 90	mosaico	L (23,5 cm)
ETM/Landsat 7	11/09/2000	nadir	28,5 x 28,5	185	3,4,5
Modelo Digital de Elevação (SRTM)	Fevereiro/2000	17°- 65°	90-x 90	111	C (3,1 cm)
RADARSAT-1 Wide	08/01/2003	20°- 31°	35,5 x 27,0	150	C (5,6 cm)

No processamento dos dados utilizaram-se os softwares PCI Geomatics 9.1 e Global Mapper 5. Para manipulação de dados vetoriais digitais, análises quantitativas e qualitativas, bem como para geração de mapas valeu-se do software ArcView GIS 3.3.

A partir dos materiais utilizados foram realizados os procedimentos metodológicos constantes do fluxograma demonstrado na **Figura 6.2**. As etapas estão detalhadas nos itens a seguir.

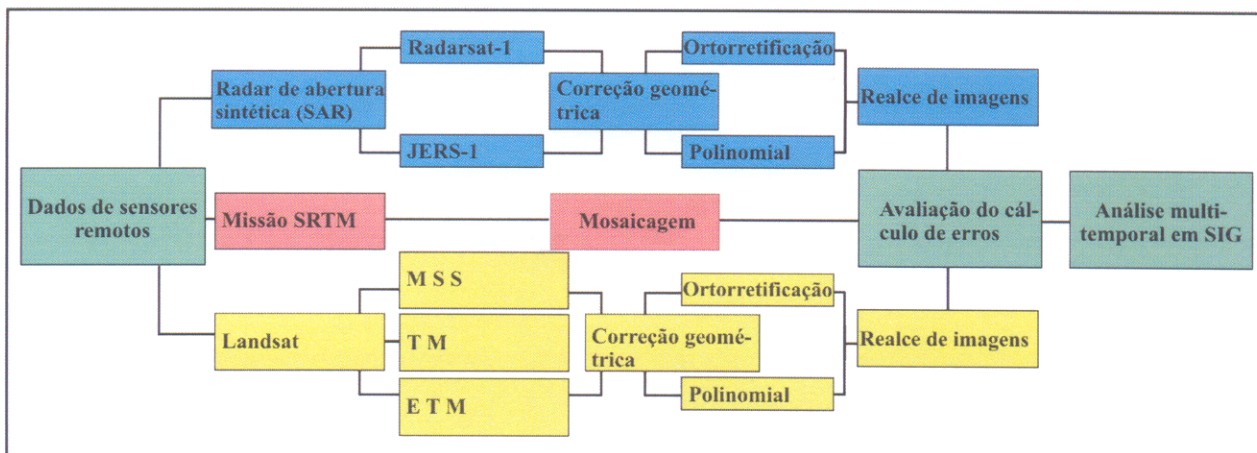


Figura 6.2 – Fluxograma da metodologia adotada nesta pesquisa.

6.3.1. Correção geométrica dos dados de sensores remotos

A etapa de correção geométrica visa relacionar os *pixels* de uma imagem com um determinado sistema de projeção cartográfica representativo da superfície terrestre, de forma que, os dados passam a ser georreferenciados (Crósta, 1992).

Neste trabalho, duas metodologias para correção geométrica foram empregadas. Nas imagens TM/ETM-Landsat e SAR/Radarsat de 2000, o método utilizado foi a correção geométrica de alta precisão ou ortorretificação, conforme modelo proposto por Toutin (1995). Nas imagens MSS/Landsat e JERS-1, valeu-se do uso do modelo matemático polinomial de primeira ordem, face a indisponibilidade dos dados de efemérides dos sensores.

As imagens Landsat (de 1992 e 2000) não foram corrigidas geometricamente, uma vez que estas já foram adquiridas ortorretificadas (Tucker *et al.*, 2004). A utilização destes produtos, garantiu a padronização do processo de georreferenciamento, permitindo a sobreposição de imagens e a comparação de dados pixel-a-pixel.

Em todos os casos, as imagens foram corrigidas geometricamente para a projeção cartográfica geográfica e o elipsóide WGS 84.

Na ortorretificação da imagem RADARSAT-1 Wide, o DEM utilizado foi extraído do modelo digital de elevação SRTM produzido pela NASA (Rabus *et al.*, 2003). A coleta de pontos de controle-GCP's foi realizada pelo método imagem-imagem, ou seja, a partir de uma imagem

ortorretificada foram extraídos pontos com latitude (X), longitude (Y) e altimetria (Z). As imagens Landsat TM 4 (1992) e Landsat ETM 7 (2000), foram tomadas com referência nesta etapa. No final, foram coletados 17 pontos de controle e o erro estabelecido (RMS) foi de 1,72 *pixels*.

Para o georreferenciamento da imagem JERS-1, o mosaico com 5° de latitude por 5° de longitude que recobre o Estado do Amapá foi recortado no trecho que corresponde a área de trabalho e logo após foi registrado a partir da imagem Landsat ETM 7, sendo este procedimento adotado a fim de que se pudesse manter as características originais da geometria da imagem óptica. O registro foi realizado com a aquisição de 34 pontos de controle, obtendo-se erro (RMS) menor que um *pixel*, com reamostragem pelo método do vizinho mais próximo.

Por fim, a cena Landsat MSS, foi corrigida a partir da imagem Landsat de 2000, selecionando-se 18 pontos de controle, obtendo-se erros (RMS) de 0,81 pixel (63,99m).

Considerando o erro obtido durante o processo de georreferenciamento das imagens a partir dos pontos de controle adicionados e mediante regra de três simples, estabeleceu-se a margem de erro geométrico para cada imagem e o erro geométrico máximo ou cumulativo para cada período analisado (**Tabela 6.2**).

Tabela 6.2. Margem do erro geométrico de cada imagem e cumulativo para o período analisado.

Ano de aquisição da imagem	Erro geométrico individual			Intervalo de tempo	Erro geométrico cumulativo	
	Por área (Km ²)	Linear (m)	RMS (por pixel)		Por área (Km ²)	Linear (m)
1980	0,0050	63,99	0,81	1980/1992	0,0055	42,87
1992	0,0005	18,32	0,61	1992/1996	0,0054	71,42
1996	0,0049	53,10	0,59	1996/2000	0,0054	69,99
2000	0,0005	16,89	0,56	2000/2003	0,0008	38,39
2003	0,0003	21,50	1,72			

6.3.2. Avaliação do cálculo de erros a partir dos pontos de controle

Esta técnica permite excluir da análise multi-temporal, ou seja, das quantificações, os erros inerentes à correção geométrica das imagens, evitando interpretações equivocadas sobre a erosão e sedimentação costeira. Por exemplo, na interpretação das cenas geradas no período de 1980 a 1992, pode-se afirmar que alterações na linha de costa, ocorridas em áreas com até

0,0055km² ou de até 42,87m de distâncias lineares (erro geométrico cumulativo) são desconsideradas em função de estarem fora do limite de detecção dos dados orbitais. Conseqüentemente, regiões que apresentarem modificações no período com esta magnitude são consideradas como estáveis na interface da linha de costa.

6.3.3. Realce das imagens

As técnicas de realce visam melhorar a capacidade de discriminação de objetos numa imagem. A manipulação do contraste consiste na modificação da forma do histograma, responsável pela distribuição do nível de cinza em relação à frequência de ocorrência de *pixels* para cada valor digital entre 0 e 255 (Novo, 1992). Neste trabalho utilizou-se o contraste linear como ferramenta de realce.

6.3.4. Análise dos dados em sistemas de informações geográficas

Após as etapas de processamento dos dados orbitais, foram traçados manualmente, com o uso do software ArcView 3.3, vetores marcando a posição da linha de costa em todas as imagens analisadas. Em seguida, realizou-se a edição de polígonos, a sobreposição dos vetores, classificação e quantificação das áreas onde ocorreram mudanças, bem como, a mensuração de distâncias lineares, taxas e porcentagens.

Com o emprego desta técnica foram mapeadas, comparadas e quantificadas as diferentes mudanças ocorridas na linha de costa, relacionadas com a erosão e sedimentação durante o período de vinte e três anos. Os resultados desta análise permitiram o mapeamento e a setorização da área de estudo de acordo com processo dominante: progradação (acumulação de sedimentos) e retrogradação (erosão) bem como, a identificação da direção e distribuição espacial das mudanças de médio período ocorridas na posição da linha de costa.

6.3.4.1. Delimitação e evolução dos manguezais costeiros

Existem diversas estimativas da área total ocupada por manguezais na costa amazônica brasileira (Herz, 1991; Kjerfve *et al.*, 2002; Souza Filho, 2005). Herz (1991) publicou a partir da

análise de imagens geradas no Projeto RADAM, pelo radar GEMS-1 na década de 70, o primeiro mapa consolidado das áreas de manguezal do Brasil na escala de 1:250.000.

Nesta abordagem, o resultado apresentado por esse estudo foi comparado com os produtos atuais de sensores remotos aqui utilizados. Para tanto, em ambiente de banco de dados geográfico (SIG), foram traçados polígonos com os limites dos manguezais no ano de 2003 e calculadas as áreas para cada setor individualizado. Esta atividade objetivou conhecer a dinâmica evolutiva dos bosques de manguezais situados no Parque Nacional do Cabo Orange no período de vinte e três anos.

6.3.5. Trabalhos de campo

Um sobrevôo e uma excursão de campo foram realizados durante os meses de julho (período chuvoso) e setembro (período seco) de 2005. Nas áreas visitadas, os trabalhos foram de caracterização e validação das informações extraídas a partir dos produtos de sensoriamento remoto, especificamente, na identificação da configuração dos processos atuantes na linha de costa relacionados com a deposição e erosão costeira. De forma complementar, o sobrevôo contribuiu com o reconhecimento das áreas de difícil acesso.

6.4. RESULTADOS

6.4.1. Modificações da linha de costa

Ao se observar as diferentes posições assumidas pela linha de costa ao longo do período analisado, a área de estudo foi subdividida em três setores, de acordo com o processo dominante, isto é, erosão ou acreção (**Figura 6.3**). O **Setor 1** possui cerca de 90 Km de extensão e compreende desde a Ponta do Mosquito (foz do rio Uaçá) até a desembocadura do rio Cassiporé (nordeste do cabo Orange). O **Setor 2** equivale a foz do rio Cassiporé e se estende por cerca de 20 Km e o **Setor 3** representa o cabo Cassiporé (até a Ponta do Marrecal), possuindo uma extensão de 50 Km.

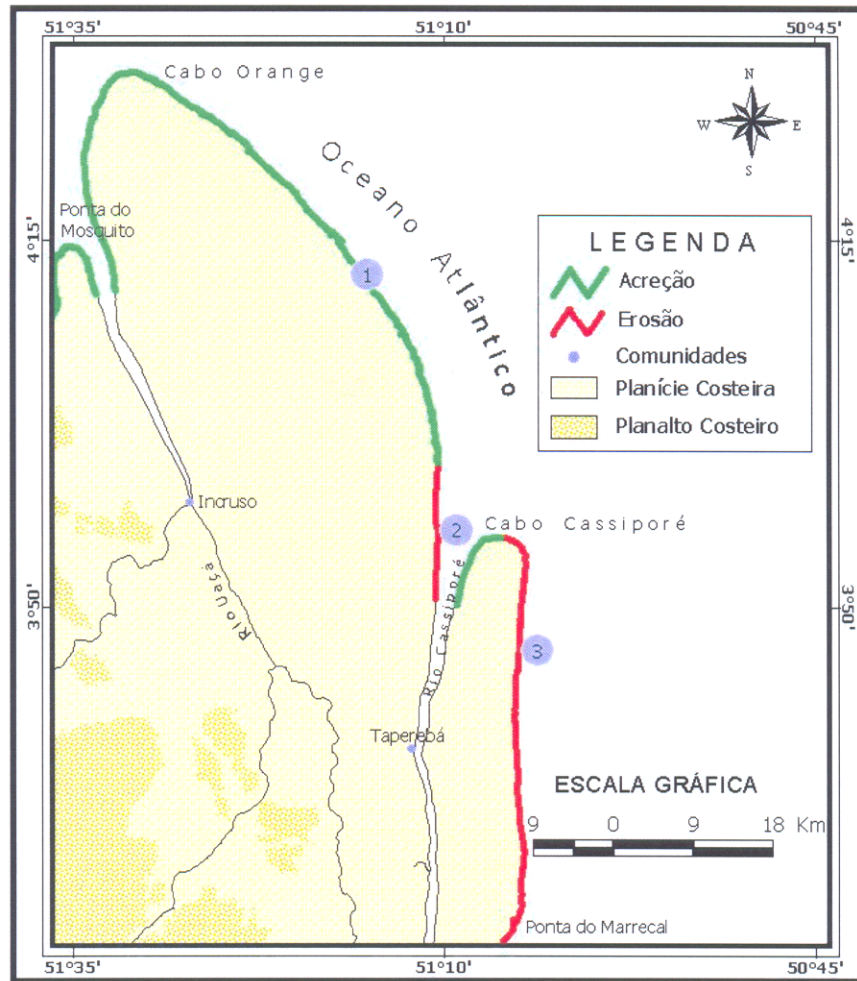


Figura 6.3 – Áreas de erosão e acreção ao longo da linha de costa dos cabos Cassiporé e Orange. Junto ao litoral, os números representam a setorização da área conforme o processo dominante (erosão ou acreção).

6.4.1.1. Cabo Orange - Setor 1

Comparações entre as diferentes imagens de sensores remotos (de 1980 a 2003) demonstram que em todo o período analisado o cabo Orange sofreu acreção de sedimentos, com diferentes taxas de acumulação para cada série temporal de imagens (**Figura 6.4**). A resposta natural da linha de costa à deposição de sedimentos foi a formação de bosques jovens de mangue junto à planície lamosa.

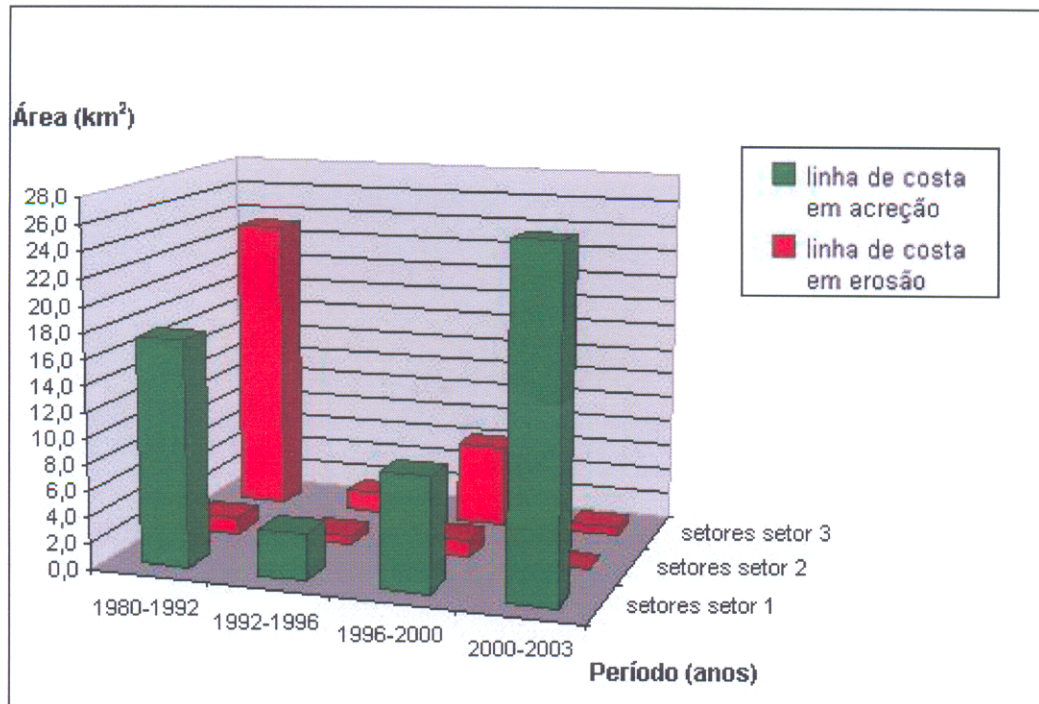


Figura 6.4 – Taxas de acumulação/erosão quantificadas na área de estudo.

Neste setor os pulsos de variação da linha de costa, registrados com o crescimento da vegetação de mangue, quando quantificados, foram estimados em 55,85Km² de sedimentos anexados a zona costeira no período de vinte e três anos. As maiores taxas de progradação costeira aconteceram no período de 2000-2003, quando quase metade desta área (26,13 Km²) foi ocupada pela vegetação de mangue, ou seja, progradou em direção ao mar. Este processo aconteceu, provavelmente, devido a presença de bancos lamosos em *offshore*. Linearmente, a planície avançou ao longo dos 23 anos investigados ~566,2m (24,6m/ano).

A **Tabela 6.3** quantifica por setor trabalhado, as mudanças ocorridas em termos de erosão (-) ou sedimentação (+) a partir de polígonos da vegetação de mangue estabelecida no litoral e apresenta, ao final, um balanço sedimentar dos três setores envolvidos.

Tabela 6.3: Modificações ocorridas na linha de costa: acreção (+) e erosão (-) costeira no período de 1980-2003.

Período (anos)	Setor 1: Cabo Orange		Setor 2: Foz do Rio Cassiporé		Setor 3: Cabo Cassiporé	
	Área (km ²)	Distância linear (m)	Área (km ²)	Distância linear (m)	Área (km ²)	Distância linear (m)
1980-1992	+17,48	194,2	-1,21	60,5	-23,19	463,8
1992-1996	+3,53	39,2	-0,75	33,0	-1,56	31,2
1996-2000	+8,71	96,7	-1,34	67,2	-6,28	125,6
2000-2003	+26,13	236,1	-0,13	7,2	-0,66	13,2
Balanco sedimentar por área (1980-2003)	+55,85	566,2	-3,43	167,9	-31,69	633,8

As feições morfológicas resultantes do processo de deposição sedimentar na área de estudo são representadas por extensas planícies de maré lamosa, pelos bancos lamosos de inframaré e pelos cabos lamosos. Nas imagens de radar tomadas em baixa-mar, podem ser observados, ao longo do litoral do cabo Orange a presença de bancos lamosos em tons escuros (**Figura 6.5A**), devido o mecanismo de espalhamento especular que causa um contraste com a vegetação de mangue que espalha de forma difusa (tons de cinza; **Figura 6.5B**).

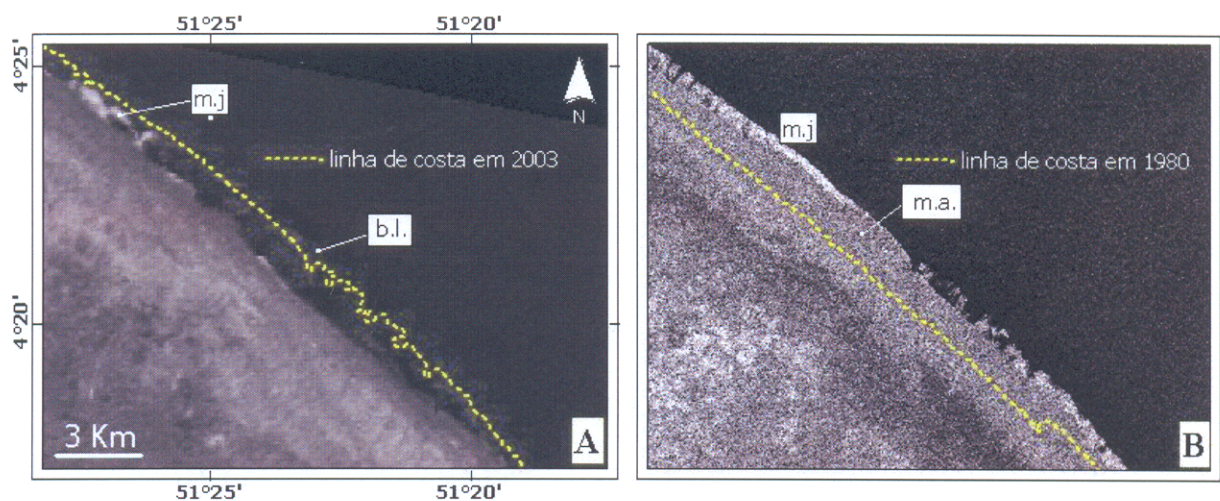


Figura 6.5 – Evolução da linha de costa ao longo do cabo Orange: A) imagem JERS-1 obtida em 1996 superposta por um vetor da linha de costa em 2003. B) imagem Radarsat-1 obtida em 2003 superposta por um vetor da linha de costa em 1980. Observar as feições e ambientes morfológicos: m.j = mangue jovem; m.a. = mangue adulto, b.l. = bancos lamosos.

No cabo Orange as planícies de maré lamosa desenvolvem uma vegetação pioneira de mangue, constituída principalmente pelas espécies *Avicennia sp.* O manguezal contribui diretamente para o processo geomorfológico de progradação, pois fornece um mecanismo adicional de retenção e fixação de sedimentos, atuando como "armadilhas" para o sedimento e servindo também como proteção à remoção pelo ataque das ondas (Allison *et al.*, 2000). Apresenta padrões de sucessão vegetal denominados por Prost *et al.* (2001) como "escada", mostrando estratos de espécies pioneiras, sucedidos por bosques jovens e bosques adultos (**Figura 6.6**).



Figura 6.6 – Processo e feição morfológica decorrente da acreção costeira no cabo Orange: crescimento do cabo lamoso com sucessão de vegetação pioneira e jovem de mangue estabelecida.

No extremo norte, os manguezais estendem-se em toda parte frontal e lateral do cabo Orange, apresentando sucessões em forma de arcos, com larguras que variam de 1 a 3 Km, encontrando-se em franco desenvolvimento em direção a plataforma interna (**figura 6.6**). São limitados internamente por extensos campos alagáveis (pântanos) e externamente por uma planície lamosa não vegetada (*tidal mud flat*) exposta durante a baixa-mar.

Analisando o formato curvado assumido pelo cabo Orange é possível também notar que o direcionamento do processo de acumulação de sedimentos à planície costeira neste trecho apresenta, ora comportamento acrecionário em direção NW, ora em sentido NE. Estas diferentes configurações evidenciam diferentes fases de progradação dos ambientes e feições costeiras,

resultados de períodos de maiores ou menores descargas do rio Amazonas (Silveira, 1998) ou podem estar ligadas a mudanças no comportamento das correntes de deriva litorâneas (Boaventura & Narita, 1974) .

Fenômenos de progradação costeira no local estão relacionados com mecanismos de sedimentação, controlados pelo aporte de material de fina granulometria (silte e argila) lançados pelo rio Amazonas em sua foz no Oceano Atlântico, sendo transportados por cerca de 1500 Km em direção nordeste pela ação da Corrente Costeira Norte Brasileira (CCNB).

Setores progradacionais caracterizam-se morfologicamente por zonas de intermaré, onde a acumulação de sedimentos vem acontecendo junto à franja de manguezal por ocasião das preamares, através de ondas solitárias e correntes de maré em taxas de acumulação superiores a 2cm/ano (Allison, 1993). Segundo Allison *et al.* (2000), esta região encontra-se inserida numa extensa planície lamosa moderna, acrecionária, que se desenvolve desde o extremo norte do Brasil, aparentemente a partir do Cabo Orange, até a costa da Venezuela (**Figura 6.7**).

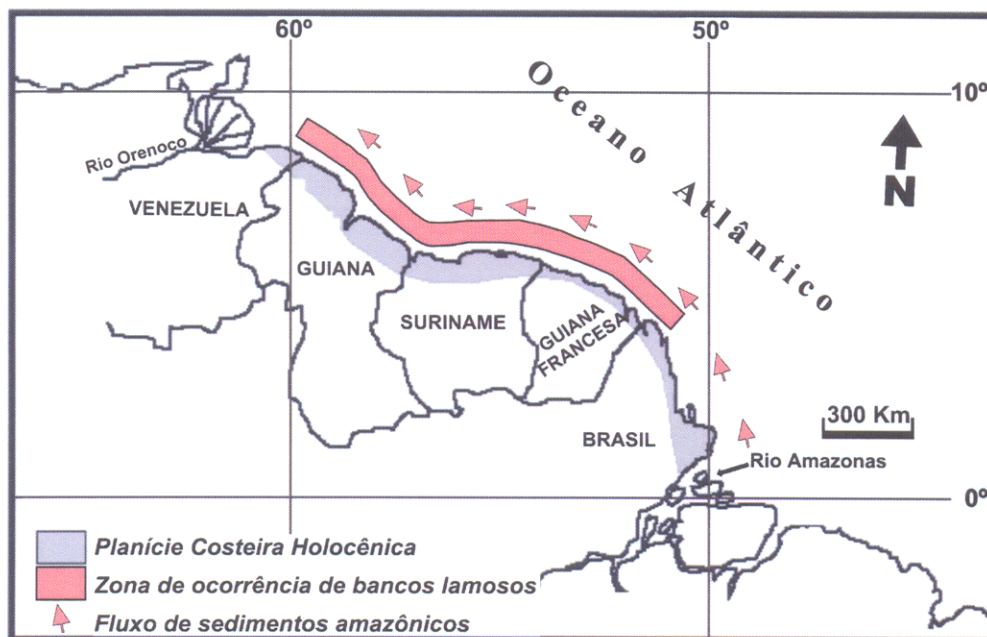


Figura 6.7 – Mapa do sistema de dispersão amazônico atuante na costa nordeste da América do Sul.
Fonte: Allison & Lee (2004)

Os estratos argilosos encontrados na planície de intermaré ao norte do Amapá, apresentam disposição paralela ao litoral, com largura variável de 2 a 5 Km após a franja de manguezal, sendo a acumulação de sedimentos recente (entre 500 – 1300 anos), em trechos da linha de costa onde a profundidade média atinge de 4 a 6 metros (Allison *et al.*, 1995b).

A planície lamosa costeira apresenta uma largura variável de até 500 metros, quando exposta durante a baixa-mar, com baixo gradiente baixo até a isóbata de 5 metros, variando de 1: 2000 no cabo Cassiporé, até 1: 3200, ao longo do flanco do cabo Orange (Allison *et al.*, 1995a), sendo recortadas, ocasionalmente, por canais de marés (*tidal creeks*) pouco profundos (<0,5m), orientados perpendicularmente à linha de costa (**Figura 6.8**).



Figura 6.8 – Planície de maré lamosa acrecionária desenvolvida junto ao cabo Orange. Observar ao fundo a presença de manguezais (foto obtida em condição de baixa-mar).

6.4.1.2. Foz do rio Cassiporé - Setor 2

A segunda área investigada atinge o estuário do rio Cassiporé, entre os cabos Cassiporé e Orange (**Figura 6.3**). O rio Cassiporé nasce entre as rochas do escudo Pré-cambriano das Guianas e despeja no Oceano Atlântico anualmente $3,8 \times 10^9$ m³ de água e $1,2 \times 10^5$ toneladas de sedimentos (Allison *et al.*, 1995a). Em seu estuário o fluxo das águas drenadas quando conjugado com a ação das marés faz desenvolver o fenômeno da pororoca.

A superposição das imagens de sensores remotos demonstra que ao longo dos 23 anos analisados, a desembocadura do rio Cassiporé vem sendo erodida em sua margem esquerda aproximadamente 7,3m/ano. Segundo Silveira (1998), na foz deste rio, a maré chega de forma inclinada, incidindo diretamente sobre a margem esquerda, provocando a erosão e formação de terraços de abrasão. A autora argumenta, ainda, que os sedimentos erodidos nesta margem

estão sendo depositados na margem direita em sistemas de barras fluviais. Estas barras, por sua vez, estão sendo colonizadas por bosques jovens de *Avicennia germinans* (Siriúba).

6.4.1.3. Cabo Cassiporé - Setor 3

Considerando o período entre 1980 e 2003 é possível perceber que, a partir da ponta norte do cabo Cassiporé até o extremo sul deste cabo lamoso, o litoral apresenta comportamento predominantemente erosivo. A transição para áreas progradantes acontece, aparentemente, a partir da foz do rio Cassiporé (**Figura 6.3**).

Neste trecho do litoral, os fenômenos de recuo da linha de costa estão relacionados com redução do suprimento sedimentar, evidenciados por mecanismos de erosão visualizados na paisagem através da diminuição da vegetação de mangue. Morfologicamente, as frentes erosivas, assim como, as áreas de acreção, estão localizadas em zonas de intermaré lamosa (**Figura 6.9**).



Figura 6.9 – Linha de costa em erosão ao longo do cabo Cassiporé.

Considerando a morfologia assumida pela lama erosiva, Allison *et al.* (1995a), denominaram como tipo "denteada" a linha de costa retrogradante situada no cabo Cassiporé,

devido à configuração irregular assumida pelo litoral em resposta à forma inclinada com que as ondas costeiras chegam à linha de costa (**Figura 6.10**).

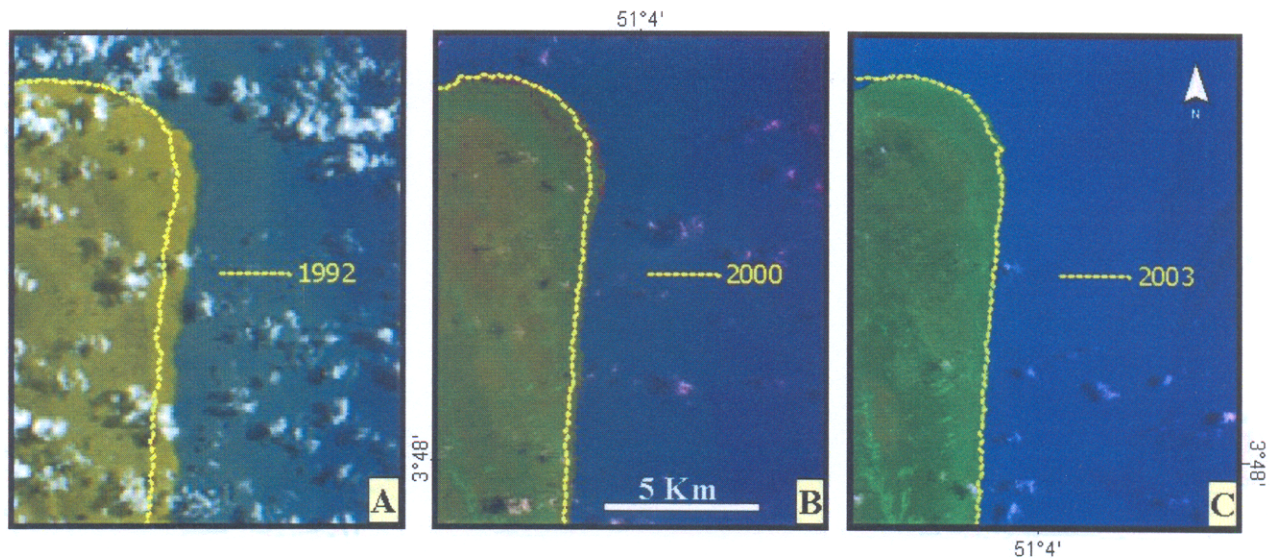


Figura 6.10 – Modificação da linha de costa ao longo do cabo Cassiporé: A) imagem Landsat MSS-2 obtida em 1980 superposta por um vetor da linha de costa em 1992. B) imagem Landsat TM-4 obtida em 1992 superposta por um vetor da linha de costa em 2000. C) imagem Landsat ETM-7 obtida 2000 superposta por um vetor da linha de costa em 2003.

A erosão da linha de manguezais é um fenômeno natural e é devida, principalmente, a configuração das correntes de maré e das ondas que atingem a zona costeira amapaense, ou seja, parâmetros hidrodinâmicos controlam o deslocamento da linha de costa para o continente, provocando a remoção/retirada do suprimento sedimentar, o que causa o solapamento das raízes do manguezal e a conseqüente queda das árvores (**Figura 6.11**).

Do processo de erosão resultam terraços lamosos, que geralmente são expostos durante a baixa-mar. A ação biológica pode acelerar o processo erosivo devido as cavidades deixadas por estes organismo durante o fluxo entre os sedimentos (Allison *et al.*, 1995a).



Figura 6.11 – Manguezal erodido ao longo da planície lamosa de intermaré desenvolvida no cabo Cassiporé na ponta do Marrecal.

No período analisado, o trecho que corresponde ao cabo Cassiporé apresentou uma diminuição na vegetação em linha reta de aproximadamente 633,8 metros, o que corresponde a quase 27,5 metros de vegetação de mangue erodidas por ano (**Tabela 6.3**). A quantificação da extensão da área afetada pela erosão foi estimada em 31,69 Km² no período.

6.4.2. Quantificação e evolução do manguezal no período

A **Figura 6.12** apresenta em escala de 1: 250.000 a distribuição de manguezais ao longo do Parque Nacional do Cabo Orange, a partir da imagem RADARSART do ano de 2003. Os manguezais mapeados na planície costeira foram estimados em 362,49 km² e colonizam o todo o litoral da área de estudo. Nas bordas dos cabos Cassiporé e Orange os manguezais ocorrem em extensões lineares inferiores a 3 Km. Nos estuários dos rios Cassiporé e Uaçá ocupam menores proporções.

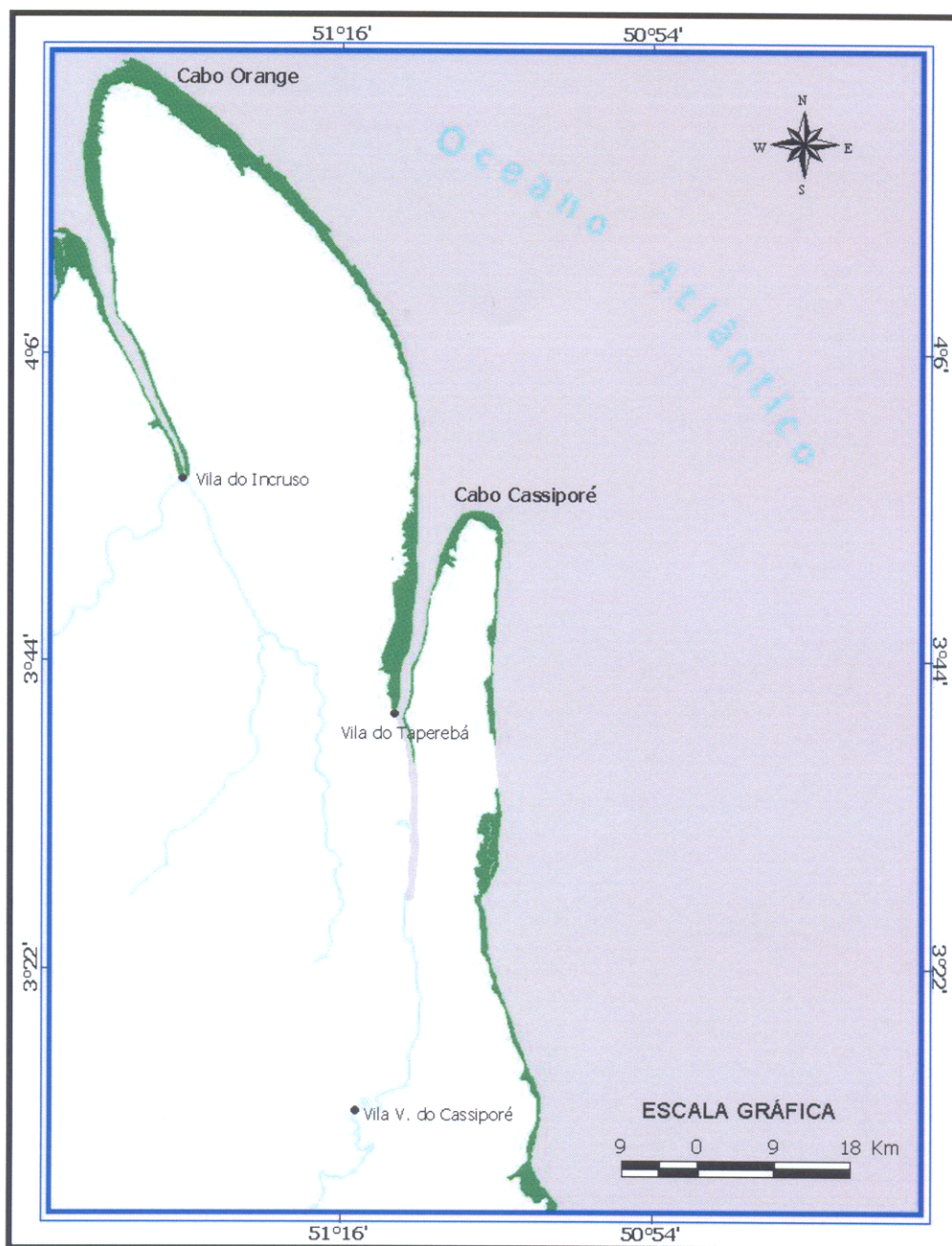


Figura 6.12 – Distribuição de manguezais (polígonos em verde) ao longo do Parque Nacional do Cabo Orange.

Na **Tabela 6.4** são feitas as comparações das áreas de manguezal obtidas por sensoriamento remoto no trabalho de Herz (1991) com os resultados obtidos neste estudo. Nestas duas avaliações, as áreas com maior ocorrência de manguezal situam-se no cabo

Orange, em resposta à deposição lamosa de sedimentos amazônicos. Os resultados demonstram também que de, maneira geral, os bosques sofreram um acréscimo ao longo período em torno de 50,8%, embora estejam em franca erosão na costa do cabo Cassiporé, onde diminuíram 5,7%.

Tabela 6.4: Área de manguezal no Parque Nacional do Cabo Orange de acordo com o levantamento realizado por Herz (1991) e aquelas obtidas no presente estudo (período de 1974-2003).

Região	Área (km ²)			
	Herz (1974) (A)	Este Estudo (2003) (B)	Varição (B-A)	Varição em % (B-A)
Cabo Orange	140,02	267,92	(+127,90)	(+ 91,3)
Cabo Cassiporé	100,36	94,57	(-5,79)	(-5,7)
Total	240,38	362,49	(+122,11)	(+50,8)

6.5. DISCUSSÕES

Flutuações na oferta de sedimentos depositados na região adjacente a foz do rio Amazonas foram objeto de estudo de diversos pesquisadores no âmbito do Projeto AMASSEDS (Allison *et al.*, 1995b; Nittrouer *et al.*, 1996; Kuehl *et al.*, 1996). Para Sommerfield *et al.* (1995), os eventos que controlam estas flutuações, em médio e longo período são decorrentes das variações na descarga do rio Amazonas (variações sazonais, por exemplo), de processos tectônicos, oceanográficos e meteorológicos.

No caso desta abordagem, onde as modificações ocorridas no litoral são classificadas em escala temporal como de curto período, os processos de erosão e acreção estão ligados com diversos fatores, especialmente, com parâmetros hidrodinâmicos (ondas, marés, fluxo de correntes costeiras, intensidade e regime de ventos) e meteorológicos.

No litoral da Guiana Francesa, as modificações na linha de costa são ocasionadas pela migração dos bancos de lama em *offshore* (Warne *et al.*, 2002; Anthony & Dolique, 2004; Lefebvre *et al.*, 2004). Trabalhos anteriores têm relacionado os processos de acumulação de sedimentos (progradação costeira por manguezais) com a chegada de bancos lamosos e a erosão com a saída (Allison & Lee, 2004; Trebossen *et al.*, 2005; Thevand & Gond, 2005). Allison & Lee (2004), propõem que existe um fluxo de troca de sedimentos entre os bancos lamosos (*mud bank*) e a planície de maré lamosa (*tidal mud flat*). Essa disponibilidade de

sedimentos, ocasionada pela chegada do banco, "alimentaria" a linha de costa e possibilitaria a rápida colonização do litoral por espécies de manguezal. De forma contrária, quando o banco migra, o litoral fica desprotegido e passa a sofrer diretamente com o "ataque" das ondas, que gera o processo de erosão.

A forma com que as ondas chegam à linha de costa (em ângulo oblíquo) no sentido do quadrante E para W (em direção a linha de costa), é responsável pela migração dos bancos lamosos (Baltzer *et al.*, 2004). Allison *et al.* (2000) advogam que a região compreendida entre a desembocadura do rio Cassiporé e o cabo Orange, é onde são gerados os bancos lamosos que migram na costa do Amapá, Guiana Francesa, Guiana, Suriname e Venezuela.

No cabo Orange dois importantes parâmetros possibilitam um ambiente favorável para deposição de sedimentos amazônicos: as marés e ondas costeiras. É fato que, nesta região são registradas as menores amplitudes de marés ao longo da costa norte amapaense (2-3 metros), as quais têm um efeito reduzido devido a largura da plataforma adjacente (~125 Km), à presença de camadas de lama fluída e ao tipo de substrato de fundo (Gabioux *et al.*, 2006). Além de influenciarem nas marés, as lamas fluídas modificam a propagação das ondas costeiras, tornando-as do tipo "solitária", causando o amortecimento de seu efeito (Allison *et al.*, 1995b).

No cabo Cassiporé, de modo contrário, a ação das marés é mais intensa, devido sua maior amplitude. Além disso, na plataforma adjacente a esta região, bancos lamosos em *offshore* não se desenvolvem (Allison *et al.*, 1995a, 1995b, 2000), portanto o litoral está praticamente desprotegido do "ataque" das ondas.

Allison *et al.* (1995a, 1995b, 2000) admite que em ambos os cabos lamosos, os processos de erosão e sedimentação costeira têm variação sazonal de décadas e estão, também, relacionados com a oferta de sedimentos amazônicos na linha costa e com o regime e intensidade dos ventos. As características do regime de ventos teriam correlação com os processos costeiros sedimentares estabelecidos dentro do sistema de dispersão amazônico em médio a longo período (Augustinus, 2004).

Outra questão importante a ser discutida, diz respeito aos valores obtidos nas quantificações das alterações ocorridas na linha de costa da área de estudo. Allison *et al.* (1995a) a partir de fotografias aéreas de baixa altitude (<500m) tomadas nos anos de 1989 e 1992, suplementadas por imagens Landsat e de radar obtidas pelo Projeto RADAM, estipularam a partir da vegetação costeira, que o recuo da linha de costa na região do cabo Cassiporé é de, aproximadamente, 0,5 – 1,0 metro/ano. Estes valores estão bem abaixo dos obtidos neste

trabalho, que determinaram uma erosão no cabo Cassiporé com distâncias lineares de 27,5 metros por ano. Mesmo quando subtraímos o erro geométrico cumulativo linear (**Tabela 6.2**), ainda teríamos valores bem superiores ($\sim 17\text{m/ano}$).

Possivelmente a diferença entre as metodologias utilizadas seja a causa das divergências entre os quantitativos. Embora Allison *et al.*, (1995a) não deixem claro o método utilizado para o cálculo de áreas, nesta pesquisa valeram-se do uso de processos baseados em modelos de georreferenciamento e superposição de imagens digitais, os quais garantem precisão para as quantificações.

6.6. CONCLUSÕES

O balanço entre as taxas de erosão e deposição costeira para área de estudo indica a preponderância dos processos progracionais sobre os retrogradacionais, o que corrobora com os trabalhos anteriores propostos por Allison (1993) e Allison *et al.*, (1995a). No entanto, nos cálculos lineares e das áreas afetadas por estes processos, esta pesquisa apresenta quantitativos de acumulação e erosão lineares bem superiores à aquelas obtidas por esses autores.

A presença de bancos lamosos localizados na zona de inframaré, conjugado com a amplitude das marés e com o regime de ventos, exerce importante influência na extensão e intensidade dos processos mapeados. Os padrões naturais de erosão e deposição, que condicionam a morfologia e a posição da linha de costa, apresentaram diferenças entre o cabo Orange e o cabo Cassiporé. Enquanto que no cabo Orange predominam os processos acrecionários, no cabo Cassiporé a erosão é característica notável em toda linha de costa.

A abordagem utilizada baseada na sobreposição espacial de vetores extraídos de imagens de sensores remotos, permitiu o mapeamento das áreas com incremento e diminuição dos manguezais, apresentando produtos que quantificaram, em termos de área, as alterações ocorridas na linha de costa em médio período. A análise multi-temporal permitiu, ainda, o monitoramento da distribuição de manguezais ao longo do Parque Nacional do Cabo Orange ao longo de três décadas.

O emprego de dados orbitais, devidamente processados, tornou possível mensurar, de modo geral, qualitativa e quantitativamente, diferentes posições de formas progracionais e

retrogradacionais, possibilitando o conhecimento e disposição da morfologia costeira de detalhe, ao expor informações ligadas a direção, intensidade e abrangência dos fenômenos.

No que se refere a quantificação com acurácia de fenômenos erosivos e deposicionais mediante o uso de dados de sensores remotos ópticos, ficou demonstrado que estes apresentam limitações referentes ao tamanho do pixel das imagens Landsat (30 m), limitações espectrais, em função da intensa cobertura de nuvens tão comuns nas regiões tropicais, com é o caso da amazônica brasileira. É fato que a presença de nuvens gera dificuldades no processo de interpretação de dados orbitais ou suprime informações sobre a superfície imageada.

Neste sentido, o emprego de dados SAR (Radar de Abertura Sintética) a partir dos sistemas sensores Radarsat-1, JERS-1 e SRTM permitiram a realização do monitoramento costeiro com melhor precisão, considerando a versatilidade da faixa das microondas em ambientes tropicais por não apresentarem interferência causada por fatores de ordem atmosférica.

A reconstituição do histórico da costa amazônica no contexto do sistema de dispersão amazônico desenvolvido na costa nordeste de América do Sul, que compreende a costa do Amapá (Brasil) até o Suriname, permitirá uma visão global, ou seja, integrada dos mecanismos que modelam a linha de costa em curto, médio e longo período, adicionando informações tão necessárias para constituição de um modelo de previsão de larga escala e longo período.

CAPÍTULO 7

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os processos costeiros que condicionaram o desenvolvimento da planície costeira norte amapaense são controlados, em maior proporção, pelo fluxo de água doce e sedimentos despejados pelo Rio Amazonas em sua foz ao sul do Estado do Amapá. Durante todo o Quaternário, as lamas amazônicas têm sido depositadas em sentido longitudinal na região dos cabos Cassiporé e Orange, fazendo desenvolver a partir desta região em direção norte, a ocorrência de cabos lamosos, extensas planícies de maré lamosa e bancos de lama de inframaré.

Com o uso de imagens de sensores remotos orbitais com diferentes parâmetros (microondas e óptico), adquiridas sob condições ambientais variadas (marés e precipitação), este trabalho reconheceu e mapeou na área de estudo, em escala de detalhe, oito ambientes costeiros, os quais foram agrupados em três domínios geomorfológicos: planalto costeiro, planície costeira (campos alagáveis de supramaré, manguezais de intermaré, planície de lama – *tidal mudflats*) e planície aluvial (pântanos de água doce, lagos, depósitos de barras fluvial e planície de inundação fluvial).

A imagem do sensor remoto óptico Landsat ETM 7 (2000) coletada no período de estiagem amazônica (setembro) apresentou-se como ótimo produto para coleta de dados geomorfológicos devido sua sensibilidade à variação físico-química presente nos ambientes costeiros desenvolvidos nos cabos lamosos amapaenses. No entanto, apresentou limitações espectrais devido a densa cobertura de nuvem tão característica em regiões tropicais. Nesta abordagem, a utilização da segunda Componente Principal-PCA extraída a partir da referida imagem exibiu um excelente contraste entre os ambientes e feições costeiras na área de estudo.

Devido a presença de afloramentos rochosos do Escudo das Guianas na área de estudo, foi possível perceber nas imagens de radar alterações nos parâmetros de rugosidade das superfícies em escala de macro e microtopografia, além de alterações no conteúdo de umidade (constante dielétrica), permitindo uma nítida separação entre os domínios geomorfológicos planalto e planície costeira.

No entanto, no interior do cabo Orange, a influência das chuvas e amplitude das marés gerou dificuldades na discriminação e separação dos ambientes de pântanos de água doce e planície de maré, a partir da imagem SAR/RADARSAT-1, devido o mecanismo de

retroespalhamento ser influenciado pela inundação pluvial e fluvial, o que causa um alto retorno do sinal, aparecendo nas imagens em tonalidades muito claras.

Nas regiões de várzea nas margens dos cursos d'água, o sensor SAR do sistema JERS-1, devido seu comprimento de onda de 23cm, apresentou forte assinatura espectral, ou seja, grande quantidade de energia retroespalhada, em função dos múltiplos espalhamentos entre a superfície da água e os componentes da floresta (*double bounce*), definindo, com grande habilidade, a extensão da planície de inundação fluvial formada as margens do Rios Uaçá, Urucauá, Cassiporé e afluentes.

Na aplicação dos dados de sensores remotos no monitoramento das modificações costeiras ocorridas em médio período da área de estudo, as imagens orbitais devidamente corrigidas geometricamente, quando inseridas em um banco de dados georreferenciado, permitiram a espacialização, quantificação com acurácia e distribuição das áreas progradantes e erosivas existentes na interface da linha de costa. A análise multi-temporal permitiu, ainda, o entendimento do processo evolutivo que controla a distribuição dos manguezais ao longo do Parque Nacional do Cabo Orange ao longo das três últimas décadas.

Estes resultados revelam o potencial de dados orbitais e dos SIG's no estudo das zonas costeiras tropicais, considerando a versatilidade destes produtos, no que diz respeito a sua precisão, periodicidade de obtenção de imagens e na gama de aplicações que na qual podem ser implementados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. 2004. **Totais pluviométricos de longo período na Sub-bacia 30 (do rio Oiapoque ao rio Araguari)**. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br/gestaoRecHidricos/InfoHidrologicas>>. Acesso em: 12 jan. 2005.
- ALLISON, M.A., 1993. **Mechanisms of Coastal Progradation and Muddy Strata Formation Adjacent to the Amazon River**. New York, State University of New York. Marine Science Research Center. 322p. (Tese de Doutorado).
- ALLISON, M.A. & LEE, M.T. 2004. Sediment exchange between Amazon mudbanks and shore-fringing mangroves in French Guiana. **Mar. Geol. 208**: 169-190.
- ALLISON, M.A.; NITROUER, C.A.; FARIA, L.E.C. 1995a. Rates and mechanisms of shoreface progradation and retreat downdrift of the Amazon river mouth. **Mar. Geol. 125**: 373-392.
- ALLISON, M.A.; NITROUER, C.A.; KINEKE, G.C. 1995b. Seasonal sediment storage on mudflats adjacent to the Amazon River. **Mar. Geol. 125**: 303-328.
- ALLISON, M.A.; LEE, M.T.; OGSTON, A.S.; ALLER, R.C. 2000. Origin of Amazon mudbanks along the northeastern coast of South America. of the Amazon river mouth. **Mar. Geol. 163**: 241-256.
- ANTHONY, E.J. & DOLIQUE, F. 2004. The influence of Amazon-derived mud banks on the morphology of sandy headland-bound beaches in Cayenne, French Guiana: a short- to long-term perspective. **Mar. Geol. 208**: 249-264.
- AUGUSTINUS, P.G.E.F. 2004. The influence of the trade winds on the coastal development of the Guianas: a synthesis. **Mar. Geol. 208**: 145-151.

- AVELAR, V.G. 2002. **Geocronologia Pb-Pb em zircão e Sm-Nd rocha total da porção Centro-Norte do Estado do Amapá-Brasil:** implicações para a evolução geodinâmica do setor oriental do escudo das Guianas. Belém, Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências. 232p. (Tese de Doutorado).
- BALTZER, F.; ALLISON, M.; FROMARD, F. 2004. Material exchange between the continental shelf and mangrove-fringed coasts with special reference to the Amazon-Guianas coast. **Mar. Geol.** **208:** 115-126.
- BAPTISTA NETO, J.A.; PONZI, V.R.A.; SICHEL, S.E. (Org.). 2004. **Introdução à geologia marinha.** Rio de Janeiro, Interciência. 281p.
- BEARDSLEY, R.C.; CANDELA, J.; LIMBURNER, R.; GEYER, W.R.; LENTZ, S.J.; CASTRO, B.; CACCHIONE, D.; CARNEIRO, N. 1995. The M₂ tide on the Amazon shelf. **Journal of Geophysical Research.** **100 (C2):** 2283-2319.
- BENTZ, C.M.; POLITANO, A.T.; GENOVEZ, P. 2005. Monitoramento ambiental de áreas costeiras e oceânicas com múltiplos sensores orbitais In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., Goiânia, 2005. **Anais.** São José dos Campos, INPE, p. 2863-2869.
- BERGER, A.R. 1996. The geindicator concept and its application: an introduction. ANTONY, R.B.; WILLIAM, J.I.; IAMS, J. (Ed.) **Ge indicators: assessing rapid environmental changes in earth systems.** Rotterdam, A.A. Balkema. p. 1-14.
- BEZERRA, P.E.L.; OLIVEIRA, W.; REGIS, W.D.E.; BRAZÃO, J.E.M.; GAVINHO, I.; COUTINHO, R.C.P. 1990. Amazônia Legal: zoneamento das potencialidades e dos recursos naturais. In: INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA & SUDAM. **Projeto zoneamento das potencialidades dos recursos naturais da Amazônia Legal:** geologia, solos e vegetação. Rio de Janeiro, [s.n.] p. 9-89.

- BOAVENTURA, F.M.C. & NARITA, C. 1974. Geomorfologia. In: PROJETO RADAM. **Folha NA/NB.22 – Macapá**. Rio de Janeiro: DNPM. Parte II, p.1-36. (Levantamento de Recursos Naturais, v.6).
- BRASIL. 1980. Decreto Federal n.º 84.913, de 15 de julho de 1980. Cria no Território Federal do Amapá o Parque Nacional do Cabo Orange. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 16 jul. 1980, Preliminares, Seção I, p. 13456-13457.
- BURROUGH, P.A. 1986. **Principles of geographical information systems for land resources assessment**. Oxford, Clarendon Press. 193p.
- CÂMARA, G. 1994. Anatomia de um SIG. **Fator GIS: a Revista do Geoprocessamento**, **1(4)**: 11-15.
- CÂMARA, G. *et al.* 1999. **Conceitos básicos em Geoprocessamento**. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/cap1-introducao.pdf>>. Acesso em: 22 nov. 2004.
- CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS-CPTEC. 2006. **Dados observacionais**. Disponível em: <http://www.cptec.inpe.br/dados_observados>. Acesso em: 25 jan. 2006.
- CHAVEZ JR., P.S. 1988. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. **Remote Sensing of Environment** **24**: 450-479.
- CHAVEZ JR., P.S. & ANDERSON, A. 1991. Comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data: Landsat TM and Spot panchromatic. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing** **57 (3)**: 295-303.
- CHAVEZ JR., P.S.; BERLIN, G.L.; SOWELL, J.A. 1982. Statistical method for selection LANDSAT MSS rations. **Journal of Applied Photogrammetric Engineering**. **8**: 23-30.
- CHIEN, P. 2000. Endeavour maps the world in thee dimensions. **Geoworld** **37**: 32-38.

- CHU, Z.X.; SUN, X.G.; ZHAI, S.K.; XU, K.H. 2006. Changing pattern of accretion/erosion of the modern Yellow River (Huanghe) subaerial delta, China: Based on remote sensing images. **Mar. Geol.** **227**: 13-30.
- CIAVOLA, P.; MANTOVANI, F.; SIMEONI, U.; TESSARI, U. 1999. Relation between river dynamic and coastal changes in Albania: an assessment integrating satellite imagery with historical data. **International Journal of Remote Sensing**, **20**: 561-584.
- CPRM - Serviço Geológico do Brasil. 2004. **Carta geológica do Brasil ao milionésimo - Folha NA-21**. Windows 98/2000/XP. CD ROM.
- CRÓSTA, A. P. 1992. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. Campinas-SP, IG/UNICAMP. 170p.
- DAVIS Jr., R.A. 1983. **Depositional systems. A genetic approach to sedimentary geology**. Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice-Hall. 669p.
- DHN (DEPARTAMENTO DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO). 2004. **Tábuas de marés para 2003. Costa do Brasil e alguns portos estrangeiros**. Rio de Janeiro, DHN. p. 1-6.
- DHN (DEPARTAMENTO DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO). 2005. **Tábuas de marés para 2004. Costa do Brasil e alguns portos estrangeiros**. Rio de Janeiro, DHN. p. 1-6.
- DUTRA, V.L.; MURA, J.C.; FREITAS, C.C.; SANTOS, J.R.; ELMIRO, M.T. 2003. Processamento de Imagens de Radar de Abertura Sintética – Princípios e Aplicações. In: Workshop em Tratamento de Imagens 4., Belo Horizonte. **Anais**. GNPDI/DCC/ICEx/UFMG, p. 4-13.
- ELACHI, C. 1997. **Spaceborne Radar Remote Sensing: Applications and Techniques**. New York, IEEE Geoscience and Remote Sensing Society. 231 p.

- FAURE, J.F. 2001. Multitemporal analysis of mangrove spatial dynamics in São Caetano de Odivelas, Pará, Brazil. In: M.T. PROST & A.C. MENDES (Ed.) **Ecosistemas costeiros: impactos e gestão ambiental**. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, p. 39-49.
- FLORENZANO, T.G. 2002. **Imagens de satélite para estudos ambientais**. São Paulo, Oficina de textos. 97p.
- FONTES, C.R.F., 2000. Estudo **numérico da circulação na Plataforma Continental Amazônica (PCA)**. São Paulo, Universidade de São Paulo. 128p. (Tese de Doutorado).
- FORBES D.L. & LIVERMAN D.G.E. 1996. Geological indicators in the coastal zone. In: A.R. BERGER & W.J. IAMS (Ed.). **Geoindicators: assessing rapid environmental changes in earth systems**. Rotterdam, A.A.Balkema. p. 175-192.
- FRANÇA, C.F. & SOUZA FILHO, P.W.M. 2003. Análise das mudanças morfológicas costeiras de médio período na margem leste da Ilha de Marajó (PA) em imagem Landsat. **Revista brasileira de Geociências, 33(2-Suplemento) : 127-136**.
- FREEMAN, A.; CHAPMAN, B.; SIQUEIRA, P. 2002. The JERS-1 Amazon Multi-Season Mapping Study (JAMMS): Science objectives and implications for future missions. **International Journal of Remote Sensing, 23: 1447– 1460**.
- FROIDEFONDE, J.M.; LAHET, F.; HU, C.; DOXARAN, D.; GUIRAL, D.; PROST, M.T.; TERNON, J-F. 2004. Mudflats and mud suspension observed from satellite data in French Guiana. **Marine Geology, 208: 153-168**.
- FROMARD, F.; VEGA, C.; PROISY, C. 2004. Half a century of dynamic coastal change affecting mangrove shorelines of French Guiana. A case study based on remote sensing data analysis and field surveys. **Marine Geology, 208: 265-280**.

- FROST, V.S.; STILES, J.A.; SHNMUGAN, K.S.; HOLTZMAN, J.C. 1982. A model for radar images and its applications to adaptative digital filtering of multiplicative noise. **IEE Trans. On Pattern Analysis Machine Intelligence, 4:** 157-166.
- FUNBIO – Fundação BIO Rio. 2002. **Avaliação e ações prioritárias para a conservação da biodiversidade das zonas costeira e marinha.** Relatório técnico. Fundação BIO RIO. 245 pg.
- GABIOUX, M.; VINZON, S.B.; PAIVA, A.M. 2005. Tidal propagation over fluid mud layers on the Amazon shelf. **Continental Shelf Research, 25:** 113-125.
- GEYER, W.R. & KINEKE, G.C. 1995. Observations of currents and water properties in the Amazon frontal zone. **Journal of Geophysical Research, 100(C2):** 2321-2339.
- GEYER, W.R.; BEARDSLEY, R.C.; CANDELA, J.; CASTRO, B.M.; LEHECKIS, R.V.; LENTZ, S.J.; LIMEBURNER, R.; MIRANDA, L.B.; TROWBRIDGE, J.H. 1991. The physical oceanography of the Amazon outflow. **Oceanography, 4(1):** 8-15
- GIBBS, R.J. 1970. Circulation in the Amazon river estuary and adjacent Atlantic ocean. **Journal of Marine Research, 28:** 113-123.
- GIBBS, R.J. 1973. The bottom sediments of the Amazon shelf and the tropical Atlantic Ocean. **Marine Geology, 14:** M39-M45.
- GIBBS, R.J., 1977. Clay mineral segregation in the marine environment. **J. Sediment. Petrology, 47:** 237-243.
- GLOBAL RAIN FOREST MAPPING – GRFM. 1998. **Mosaico de imagens e detalhes do Projeto JERS-1.** CD-ROM.

- GONÇALVES, F.D. 2005. **Utilização de dados de sensores remotos para o mapeamento dos índices de sensibilidade ambiental a derramamento de óleo na Baía de Guajará, Belém-PA.** Belém, Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências. 179p. (Dissertação de Mestrado).
- GOODCHILD, M.F. 1991. **Spatial Analysis with GIS: Problems and Prospects GIS/LIS 1991.** Georgia, The Inforum Atlanta. p. 40-48.
- GOWDA, H.H.; GANESHA RAJ, K.; PADMAVATHY, A.S.; MANIKIAN, B. 1995. Multidate satellite data for study of dynamic of coastal landforms of Uttara Kannada, South India. **International Journal of Remote Sensing, 16:** 2539-2553.
- GUERRA, A.T. & GUERRA, A.J.T. 2003. **Novo dicionário geológico-geomorfológico.** Rio de Janeiro, Bertrand Brasil. 652p.
- HERZ, R. 1991. **Manguezais do Brasil.** São Paulo, EDUSP. 54 p.
- HESS, L.L.; MELACK, J.M.; NOVO, E.M.L.M; BARBOSA, C.C.F; GASTIL, M. 2003. Dual-season mapping of wetland inundation and vegetation for the central Amazon basin. **Remote Sensing of Environment 87:** 404-428.
- IEPA/IBAMA. 2003. **Levantamento dos aspectos Abióticos e Bióticos da Área de Entorno do Parque Nacional do Cabo Orange.** Amapá, 31 p. (Relatório Técnico).
- JENSEN, J.R. 2000. **Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective.** New York, Prentice Hall. 544 p.
- KELLNDORFER, J.; WALKER, W.; PIERCE, L.; DOBSON, C.; FITES, J.A.; HUNSAKER, C; VONA, J.; CLUTTER, M. 2004. Vegetation height estimation from Shuttle Radar Topography Mission and National Elevation Datasets. **Remote Sensing of Environment, 93:** 339-358.

- KJERFVE, B.; PERILLO, G. M. E.; GARDNER, L. R.; RINE, J. M.; DIAS, G.T.M.; MOCHEL, F.R. 2002. Morphodynamics of muddy environments along the Atlantic coasts of North and South America. In: HEALY, T. R.; WANG, Y.; HEALY, J-A. (Eds). **Muddy Coasts of the World: Processes, Deposits and Functions**. Amsterdam, Elsevier Science. p. 479-532.
- KUEHL, S.A.; NITTRouer, C. A.; ALLISON, M.A.; FARIA, L.E.C. DUKAT, D.A.; JAEGER, J.M.; PACIONI, T.D.; FIGUEIREDO, A.G. ; UNDERKOFFLERT, E.C. 1996. Sediment deposition, accumulation, and seabed dynamics in an energetic fine-grained coastal environment. **Continental Shelf Research, 516 (16):** 787-815.
- KUSHWAHA, S.P.S.; DWIVEDI, R.S.; RAO, B.R.M. 2000. Evaluating of various digital image processing techniques for detection of coastal wetlands using ERS-1 SAR data. **International Journal of Remote Sensing, 21:** 565-579.
- LEFEBVRE, J.P.; DOLIQUE, F. ; GRATIOT, N. 2004. Geomorphic evolution of a coastal mudflat under oceanic influences: an example from the dynamic shoreline of French Guiana. **Marine Geology, 209:** 191-205.
- LEWIS, A.J.; HENDERSON, F.; HOLCOMB, D.W. 1998. Radar fundamentals: the geoscience perspective. In: HENDERSON, F.M. AND LEWIS, A.J. (Ed.) **Principles & Applications of Imaging Radar**. New York, John Willey & Sons. p. 131-180 (Manual of Remote Sensing).
- LIMA, M.I.C.; BEZERRA, P.E.L.; ARAÚJO, H.J.T., 1991. Sistematização da geologia do Estado do Amapá In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 3., Belém, 1991. **Anais**. Belém, SBG-Núcleo Norte, p. 322-335.
- LIU, Y.; LI, G.X.; DENG, S.G.; ZHAO, D.B.; WEN, G.Y. 2002. Evolution of erosion and accumulation in the abandoned subaqueous delta lobe of the Yellow River. **Mar. Geol. Quat. Geol, 22 (3):** 27– 34.
- LIVINGSTONE, D. A. 1963. **Chemical composition of rivers and lakes**, U.S. Geological Survey. 63 p. (Professional Paper 440G).

- LUSCH, D.P. 1999. **Introduction to Environmental Remote Sensing. SIVAM project.** CDROM.
- MEADE, R.H.; DUNNE, T.; RICHEY, J.E.; SANTOS, U.M; SALATI, E., 1985. Storage and remobilization of suspended sediment in the lower Amazon River of Brazil. **Science**, **228**: 488-490.
- MEADE, R. H.; NORDIN, C.F.; CURTIS, W.F.; RODRIGUES, F.M.C.; DO VALE, C.M.; EDMOND, J.M. 1979. Sediment loads in the Amazon River. **Nature**, **278**: 161-163.
- MENDES, A. C. 1994. **Estudo Sedimentológico e Estratigráfico dos Sedimentos Holocênicos da Planície Costeira do Amapá – Setor Compreendido entre o Cabo Orange e a Ilha do Maracá.** Belém, Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências. 345p. (Dissertação de Mestrado).
- MESERVE, J.M., 1974. **US Navy Marine Climatic Atlas of the World, 1, North Atlantic Ocean.** Washington, US Gov. Print. 371 p.
- MILLIMAN, J.D. & MEADE, R.H. 1983. World-wide delivery of river sediment to the oceans. **J. Geology**, **91**: 1-21.
- MITSCH, W.J. & GOSSELINK, J.G. 1994. **Wetlands.** USA, Van Nostrand Reinhold. 701p.
- MOREIRA, M.A. 2003. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação.** Viçosa, Editora UFV. 307p.
- NITTROUER, C. & DEMASTER, D. J. 1986. Sedimentary processes on the Amazon Continental Shelf: past, present and future research. **Continental Shelf Research**, **6 (1/2)**: 5-30.
- NITTROUER, C. A. & KUEHL, S. A. 1995. Geological significance of sediment transport and accumulation on the Amazon continental shelf. **Marine Geology**, **125(3)**: 175-176.

- NITTROUER, C.A.; DEMASTER, D. J.; FIGUEIREDO, A.G.; RINE, J.M. 1991. AmasSeds: an interdisciplinary investigation of a complex coastal environment. **Oceanography, 4:** 3-7.
- NITTROUER, C.A.; KUEHL, S.A.; FIGUEIREDO, A.G.; ALLISON, M.A.; SOMMERFIELD, C.K.; RINE, J.M.; FARIA, E.C.; SILVEIRA, O.M. 1996. The geological record preserved by Amazon shelf sedimentation. **Continental Shelf Research, 16 (5):** 817-841.
- NITTROUER, C. A.; KUEHL, S. A; STERNBERG, R.W.; FIGUEIREDO; A.G.; FARIA, L.E.C. 1995. An introduction to the geological significance of sediment transport and accumulation on the Amazon continental shelf. **Marine Geology, 125:** 177-192.
- NOERNBERG, M.A. & LANA, P.C. 2002. A sensibilidade de manguezais e marismas a impactos por óleo: fato ou mito? Uma ferramenta para a avaliação da vulnerabilidade de sistemas costeiros a derrames de óleo. **Geografares, 3:** 109-123.
- NORDSTROM, K.F. 1980. Cyclic and seasonal beach response: a comparison of oceanside and bayside beaches. **Phys. Geography (1-2):**177-196.
- NOVO, E.M.L.M. 1992. **Sensoriamento remoto:** princípios e aplicações. São Paulo, Edgard Blücher. 308p.
- OLTMAN, R.E. 1968. **Reconnaissance investigation of discharge and water quality of the Amazon River.** Washington, US. Geological Survey. 16p. (Circular 552).
- PARADELLA, W.R.; SANTOS, A.R.; VENEZIANI, P.; CUNHA, E.S.P. 2005. Radares imageadores nas geociências: estado da arte e perspectivas. **Revista Brasileira de Cartografia, 57 (1):** 56-62.
- PARADELLA, W.R.; SANTOS, A.R.; VENEZIANI, P.; MORAIS, M.C. 2000. Synthetic aperture radar for geological applications in the moist tropics: experiences from the brazilian amazon region. **Revista Brasileira de Geociências, 30 (3):** 438-542.

- PROISY, C.; MOUGIN, E.; FROMARD, F.; KARAM, M.A. 2000. Interpretation of polarimetric signatures of mangroves forests. **Remote Sensing of Environment 71**: 56-66.
- PROST, M. T. 1997. La mangrove de front de mer en Guyane: ses transformations sous l'influence du système de dispersion Amazonien et son suivi par télédétection. In: KJERFVE, B.; LACERDA, L. D.; DIOP, E. H. S. (eds.). **Mangrove ecosystem studies in Latin America and Africa**. Paris, UNESCO, p. 111-126.
- PROST M.T. ; MENDES A.C. ; FAURE, J.F. ; BERREDO, J.F. ; SALES, M.E.C. ; FURTADO, L.G.; SILVA, M.G.S. ; SILVA, C.A., NASCIMENTO, I.; GORAYEB, I. ; SECCO, M.F.V. ; LUZ, L.M. 2001. Manguezais e estuários da costa paraense: exemplo de estudo multidisciplinar integrado (Marapanim e São Caetano de Odivelas) In: M.T. PROST & A.C. MENDES (Ed.) **Ecosystemas costeiros: impactos e gestão ambiental**. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, p. 75-87.
- RABUS, B.; EINEDER, M.; ROTH, A.; BAMLER, R. 2003. The shuttle radar topography mission - A new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. **Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 57**: 241– 262.
- RADARSAT-1 International. 1995. **RADARSAT-1 Illuminated**: your guide to products and services. Canadá, Richmond. 73p.
- RANEY R.K. 1998. Radar Fundamentals: Technical perspective. In: HENDERSON, F.M.; LEWIS, A. J. (Ed.) **Principles & applications of imaging radar**: manual of remote sensing. New York, ASPRS. p. 9-130.
- ROSENQVIST, A.; SHIMADA, M.; CHAPMAN, B.; FREEMAN, A. 2000. The Global Rain Forest Mapping project - a review. **International Journal of Remote Sensing, 21**: 1375–1387.

- SANTOS, V.F.; SILVEIRA, O.F.M.; MARTINS, M.H.A.; CARVALHO, F.P. 2004. Dinâmica Geomorfológica do Setor Costeiro Estuarino do Estado do Amapá. In: INSTITUTO DE PESQUISAS CIENTÍFICAS E TECNOLÓGICAS DO ESTADO DO AMAPÁ-IEPA. **Projeto Zoneamento Ecológico-Econômico Costeiro Estuarino do Estado do Amapá**. Macapá: IEPA. Capítulo III, CDROM.
- SCHAEFFER-NOVELLI, Y., CINTROÂN-MOLERO, G., SOARES, M.L.G., DE-ROSA, T. 2000. Brazilian mangroves. **Aquatic Ecosystem Health and Management**, **3**: 561-570
- SILVA, A.B. 2003. **Sistemas de informações geo-referenciadas: conceitos e fundamentos**. Campinas, Editora da UNICAMP. 236p.
- SILVA, W.S.B. 2002. **Uso de imagens Radarsat-1 para fins de mapeamento de uso da terra e cobertura do solo em ambiente tropical úmido urbano: o caso de Manaus, Estado do Amazonas**. São José dos Campos, INPE. 159p. (Dissertação de Mestrado).
- SILVEIRA, O. F. M. 1998. **A planície costeira do Amapá: dinâmica de ambiente costeiro influenciado por grandes fontes fluviais quaternárias**. Belém, Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências. 215p. (Tese de Doutorado).
- SIQUEIRA, P.; HENSLEY, S.; SHAFFER, S.; HESS, L.; MCGARRAGH, G.; CHAPMAN, B.; FREEMAN, A. 2000. A continental-scale mosaic of the Amazon Basin using JERS-1 SAR. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, **38**: 2638– 2644.
- SOMMERFIELD, C.K.; NITTROUER, C.A.; FIGUEIREDO, A.G., 1995. Stratigraphic evidence of changes in Amazon shelf sedimentation during the late Holocene. **Mar. Geol.**, **125**: 351-371.
- SOUZA FILHO, P.W.M. 2000. **Avaliação e aplicação de dados de sensores remotos no estudo de ambientes costeiros tropicais úmidos, Bragança, Norte do Brasil**. Belém, Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências. 219p. (Tese de Doutorado).

- SOUZA FILHO, P.W.M. 2005. Costa de Manguezais de Macromaré da Amazônia: Cenários Morfológicos, Mapeamento e Quantificação a partir de Dados de Sensores Remotos. **Revista Brasileira de Geofísica**, 23(4): 427-435.
- SOUZA FILHO, P.W.M. & PARADELLA, W.R. 2001. Estudo da geomorfologia de ambientes costeiros tropicais úmidos a partir de imagens de sensores remotos. **Revista brasileira de Geociências**, 28(2) : 359-368.
- SOUZA FILHO, P.W.M. & PARADELLA, W.R. 2002. Recognition of the main geobotanical features along the Bragança mangrove coast (Brazilian, Amazon Region) from Landsat TM and RADARSAT-1 data . **Wetlands Ecology and Management**, 10: 123-132.
- SOUZA FILHO, P.W.M. & PARADELLA, W.R. 2003. Use of synthetic aperture radar for recognition of Coastal Geomorphological Features, land-use assessment and shoreline changes in Bragança coast, Pará, Northern Brazil. **Annals of the Brazilian Academy of Sciences**, 75(3): 341-356.
- SOUZA FILHO, P.W.M.; GONÇALVES, F.D.; BEISL, C.H; MIRANDA, F.P.; ALMEIDA, E.F.; CUNGA, E.R. 2005b. Sistema de observação costeira e o papel dos sensores remotos no monitoramento da costa norte brasileira, Amazônia. **Revista Brasileira de Cartografia**, 58(1): 56-62.
- SOUZA FILHO, P. W. M. ; MARTINS, E.S.F. ; COSTA, F.R. 2006. Using mangroves as geological indicator of coastal changes in the Bragança macrotidal flat, Brazilian Amazon: an approach from remote sensing data and GIS. **Ocean & Coastal Management**, 49(7-8): 462-475.
- SOUZA FILHO, P. W. M.; PARADELLA, W. R. SILVEIRA, O.F.M. 2005a. Synthetic Aperture Radar for Recognition of Coastal Features in the Wet Tropics: Applications in the Brazilian Amazon Coast. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Série Ciências Naturais**, 1: 149-154.

- SPALDING, M.; BLASCO, F.; FIELD, C. 1997. **World mangrove atlas**. Okinawa, Japão. ISME. 178 p.
- SUMMERFIELD, M. A. 1991. **Global geomorphology: an introduction to the study of landforms**. New York, Longman. 537p.
- TEIXEIRA, S.G. 2006. **Análise de Imagens de Sensores Remotos Orbitais para Mapeamento de Ambientes Costeiros Tropicais e de Índices de Sensibilidade Ambiental ao Derramamento de Óleo no Golfão Maranhense**. Belém, Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências. 186p. (Dissertação de Mestrado).
- THEVAND, A. & GOND, V. 2005. Uso do sensoriamento remoto ótico para a compreensão da dinâmica dos manguezais no contexto amazônico. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., Goiânia, 2005. **Anais**. São José dos Campos, INPE, p. 3387-3394.
- TOUTIN, T. 1995. Intégration de données multi-source: comparaison de méthodes géométriques et radiométriques. **International Journal of Remote Sensing**, **16**: 2795-2811.
- TOUTIN, T. & GRAY, L. 2000. State-of-the-art of elevation extraction from satellite SAR data. **ISPR Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, **55**: 13-33.
- TREBOSEN, H.; DEFFONTAINES, B.; CLASSEAU, N.; KOUAME, J.; RUDANT, J.P. 2005. Monitoring coastal evolution and associated littoral hazards of French Guiana shoreline with radar images. **C. R. Geoscience**, **337** : 1140-1153.
- TUCKER, C.J., GRANT, D.M., DYKSTRA, J.D., 2004. NASA's global orthorectified Landsat data set. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, **70(3)**: 313-322.
- VERSTAPPEN, H.T & ZUIDAM, R.A. 1991. **El Sistema ITC para levantamientos geomorfológicos**. The Netherlands. 89 p (ITC Publication, N^o. 10).

WARNE, A.G.; MEADE, R.H.; WHITE, W.A.; GUEVARA, E.H.; GIBEAUT, J.; SMYTH, R.C. ASLAN, A. TREMBLAY, T. 2002. Regional controls on geomorphology, hydrology, and ecosystem integrity in the Orinoco Delta, Venezuela. **Geomorphology, 44:** 273-307.

YANG, X.; DAMEN, M. C. J.; VAN ZUIDAM, R. A. 1999. Use of thematic mapper imagery with geographic information system for geomorphologic mapping in a large deltaic lowland environment. **International Journal of Remote Sensing, 20:** 659-681.